

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»
Факультет інформатики та обчислювальної техніки
Кафедра автоматики та управління в технічних системах**

До захисту допущено:

Завідувач кафедри

_____ Олександр РОЛІК

« ____ » _____ 20__ р.

Дипломний проєкт

на здобуття ступеня бакалавра

за освітньо-професійною програмою «Комп'ютеризовані системи управління»
спеціальності 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології»
на тему: «Система наведення протитанкової ракети»

Виконав:

студент IV курсу, групи ІА-62

Облаухов Владислав Юрійович

Керівник:

Доцент кафедри АУТС, к.т.н., доцент

Репнікова Наталія Борисівна

Рецензент:

Доцент кафедри АСОіУ, к.т.н., доцент

Жданова Олена Григорівна

Засвідчую, що у цьому дипломному
проєкті немає запозичень з праць
інших авторів без відповідних
посилань.

Студент _____

Київ – 2020 року

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
Факультет інформатики та обчислювальної техніки
Кафедра автоматики та управління в технічних системах

Рівень вищої освіти – перший (бакалаврський)

Спеціальність – 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології»

Освітньо-професійна програма «Комп'ютеризовані системи управління»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

_____ Олександр РОЛІК

«__» _____ 20__ р.

ЗАВДАННЯ

на дипломний проєкт студенту

Облаухову Владиславу Юрійовичу

1. Тема проєкту «Система наведення протитанкової ракети», керівник проєкту Репнікова Наталія Борисівна к.т.н, доцент, затверджені наказом по університету від «07» травня 2020р. №1081-с.
2. Термін подання студентом проєкту 09.06.2020
3. Вихідні дані до проєкту: маса ракети 10,128 кг; момент імпульсу 0,7724 кг*м²; середня густина повітря 1,1839 кг*м³; середня швидкість ракети 218 м/с; діаметр 127 мм; коефіцієнт підйомної сили рулів 0,38; коефіцієнт керуючих моментів 2,2865. Нульова похибка, перерегулювання до 10%, час перехідного процесу до 2с.
4. Зміст пояснювальної записки: огляд предметної області та існуючих рішень. Опис принципу дії та розробка структурної та функціональної схеми системи наведення ракети. Розробка моделі цифрової системи наведення ракети. Аналіз якості отриманої системи. Розробка регуляторів. Реалізація обраного регулятора.
5. Перелік графічного матеріалу: схема загальний вигляд, схема електрична структурна, схема електрична функціональна, схема часові характеристики.
6. Дата видачі завдання 30.04.2020

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання дипломного проєкту	Термін виконання етапів проєкту	Примітка
1	Аналіз предметної області	05.05.2020	
2	Опис принципу дії	10.05.2020	
4	Розробка структурної та функціональної схеми системи наведення ракети	15.05.2020	
5	Розробка математичної моделі цифрової системи наведення	18.05.2020	
6	Аналіз стійкості та якості системи	21.05.2020	
7	Розробка регулятора	24.05.2020	
8	Реалізація регулятора	25.05.2020	
9	Оформлення проєкту	01.06.2020	
10	Подання готового проєкту	09.06.2020	

Студент

Владислав ОБЛАУХОВ

Керівник

Наталія РЕПНІКОВА

АНОТАЦІЯ

Облаухов В.Ю. Система наведення протитанкової ракети. КІП ім. Ігоря Сікорського, Київ, 2020.

Проект містить 69 с. тексту, 31 рисунок, 1 таблицю, посилання на 15 літературні джерела та 4 конструкторських документи.

Ключові слова: протитанкова ракета, «Джавелін», система наведення, ПД-регулятор, цифрова система.

Об'єктом керування є протитанкова ракета.

Метою дипломного проекту є підвищення точності ураження цілі.

У дипломному проекті розроблено систему наведення протитанкової ракети, типу американського протитанкового ракетного комплексу «Джавелін», яка забезпечує точність ураження цілі. Розроблено математичну модель цифрової системи наведення та цифрову передавальну функцію системи наведення. Розроблено ПД-регулятор методом компенсації його нулем полюсу керованого процесу функції. Обраний регулятор реалізовано методом безпосередньої декомпозиції та мовою програмування ST.

Отримані результати можуть бути корисними при керуванням аналогічними чи подібними об'єктами.

SUMMARY

Oblaukhov V.Y. Guidance system for anti-tank missile. Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic institute, Kyiv, 2020.

The project contains 69 pages of text, 31 figures, 1 table, links to 15 literary sources and 4 design documents.

Keywords: anti-tank missile, «Javelin», guidance system, PD-regulator, digital system.

The object of control is an anti-tank missile.

The purpose of this research is to increase the accuracy of hitting the target.

In the diploma project is developed an anti-tank missile guidance system, such as the American «Javelin» - anti-tank missile system, which ensures the accuracy of hitting the target. A mathematical digital model of the guidance system have been developed. A PD-regulator by the method of compensation by its zero of the objective function`s pole have been developed. The selected regulator is implemented by direct decomposition method and ST programming language.

The results obtained can be useful in guiding similar objects.

**Пояснювальна записка
до дипломного проєкту
на тему: «Система наведення протитанкової
ракети»**

Київ – 2020 року

Зміст

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ ТА УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ	4
ВСТУП	5
1 АНАЛІЗ ПРЕДМЕТНОЇ ОБЛАСТІ ТА	7
ОГЛЯД ІСНУЮЧИХ РІШЕНЬ.....	7
1.1 Загальні відомості.....	7
1.2 Огляд існуючих рішень.....	13
1.2.1 Лазерне наведення ракети	14
1.2.2 Ракета з головкою самонаведення.....	15
1.3 Висновок першого розділу	16
2 ОПИС СИСТЕМИ НАВЕДЕННЯ РАКЕТИ.....	18
2.1 Опис пристрою.....	18
2.2 Опис структурної схеми системи наведення ракети	20
2.3 Опис функціональної схеми системи наведення ракети	21
2.4 Висновок другого розділу.....	23
3 РОЗРОБЛЕННЯ МОДЕЛІ ЦИФРОВОЇ СИСТЕМИ НАВЕДЕННЯ ПРОТИТАНКОВОЇ РАКЕТИ	24
3.1 Виведення математичної моделі об'єкту керування	24
3.2 Виведення цифрової передавальної функції системи	28
3.3 Висновок третього розділу	35
4 АНАЛІЗ ЦИФРОВОЇ СИСТЕМИ НАВЕДЕННЯ ПРОТИТАНКОВОЇ РАКЕТИ	36

					ІА62.180БАК.005 ПЗ		
Изм	Лист	№ докум.	Подп.	Дата			
Разраб.	Облаухов				Система наведення протитанкової ракети Пояснювальна записка	Лит.	Лист
Перевір	Репнікова						2
							Листів
							67
Н. контр.					«КПІ ім. І. Сікорського» ФІОТ група ІА-62		
Утв.							

4.1 Стійкість цифрової системи	36
4.2 Частотні характеристики цифрової системи	41
4.3 Якість цифрової системи	43
4.4 Висновок четвертого розділу	47
5 СИНТЕЗ ЦИФРОВОГО РЕГУЛЯТОРА ДЛЯ СИСТЕМИ НАВЕДЕННЯ ПРОТИТАНКОВОЇ РАКЕТИ	48
5.1 Синтез цифрового регулятора методом вибору бажаних передавальних функцій	48
5.2 Синтез цифрового ПД регулятора	53
5.3 Висновок п'ятого розділу	58
6 ПРОГРАМНА РЕАЛІЗАЦІЯ РЕГУЛЯТОРА	60
6.1 Метод безпосередньої декомпозиції	60
6.2 Реалізація регулятора мовою програмування ST	62
ВИСНОВКИ	64
ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	65
ДОДАТОК А Лістинг програмної реалізації системи наведення з регулятором	67

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ ТА УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

ПТРК – протитанковий ракетний комплекс.

ПТКР – протитанкова керована ракета.

БЧ – бойова частина.

ФПП – фотоприймальний пристрій.

КПБ – командно-пусковий блок.

ЗДЖ – змінне джерело живлення.

ГСН – головка самонаведення.

ЕОП – електронно обчислювальний пристрій.

ST (Structured Text) – мова програмування.

ПД регулятор – регулятор з пропорційною та диференціальною складовими.

					ІА62.180БАК.005 ПЗ	Лист
						4
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		

ВСТУП

З початку двадцятого століття, під час Першої світової війни, з'явився новий тип військ – танки та бронетехніка. Він дуже активно розвивався, і вже під час Другої світової війни став повноцінним і основним озброєнням в передових країнах світу. Тож проблема створення сучасних портативних та ефективних піхотних засобів боротьби з танками стоїть гостро і актуальна.

Сьогодні усі передові країни світу проводять розроблення та модернізацію пускових комплексів та протитанкових ракет. Передовими є технології ракет третього покоління – система їх наведення повністю автоматична і не потребує втручання людини в керування після пуску. Оператор у прицілі командно-пускового блоку установки вибирає ціль і, коли ракета готова, натискає пуск.

Така концепція допомагає зменшити вірогідність ураження того, хто стріляє, а, оскільки зникає необхідність ручного наведення ракети, значно збільшує вірогідність ураження цілі. Також швидше можна переключитися на наступну ціль, не очікуючи завершення польоту ракети.

Метою дипломного проєкту є підвищення точності наведення ракети та вірогідності ураження цілі.

Для досягнення поставленої мети потрібно вирішити наступні задачі:

- огляд принципу дії системи наведення;
- розробка структурної та функціональної схеми системи самонаведення;
- розробка математичної та отримання цифрової моделі об'єкта керування;
- аналіз стійкості та якості цифрової системи;
- синтез цифрового регулятора;
- синтез цифрового регулятора методом бажаних передавальних функцій;
- експериментальні дослідження з вибору кращого ПД-регулятора;
- програмування системи самонаведення.

Об'єктом керування є протитанкова ракета.

Предметом дослідження є система наведення протитанкової ракети.

					<i>IA62.180БАК.005 ПЗ</i>	Лист
						5
<i>Зм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		

У дипломному проєкті були використані наступні методи:

- метод пропорційної навігації;
- перетворення Лапласа;
- метод Z-перетворення;
- метод невизначених коефіцієнтів;
- метод вирішення кубічного рівняння шляхом приведення його до канонічного вигляду;
- дослідження стійкості за загальним критерієм, критерієм Гурвіца та критерієм Найквіста;
- дослідження якості системи частотними характеристиками;
- синтез цифрового регулятора за бажаними передавальними функціями;
- синтез цифрового ПД-регулятора шляхом компенсації його нулями полюсів цільової передавальної функції;
- реалізація цифрового регулятора шляхом безпосередньої декомпозиції.

					ІА62.180БАК.005 ПЗ	Лист
						6
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		

1 АНАЛІЗ ПРЕДМЕТНОЇ ОБЛАСТІ ТА ОГЛЯД ІСНУЮЧИХ РІШЕНЬ

1.1 Загальні відомості

Ще з кінця Першої світової війни, коли з'явилися перші танки, військові та інженери усіх ключових армій світу почали розробляти методи та засоби боротьби з новим родом військ. Перші танки були неповороткі, з тонкою протикульовою бронею та мали не дуже важке озброєння. Єдина їх мета полягала в тому, щоб дістатися позицій ворога під вогнем куль та легкої артилерії.

Під час недовгого затишшя між двома світовими війнами, яке тривало біля 20 років, усі передові армії світу активно розробляли новий род військ. Найбільш за усіх успіху досягли німецькі конструктори, які розробили масові серійні вдалі проекти та сформували нову тактику – бліцкриг, суттю якої були швидкі танкові атаки вглиб оборони супротивника та його подальше оточення.

Новий рід військ активно розвивався і більш актуальним ставало питання як з ним боротися. З танками могли боротися лише інші танки або спеціальна протитанкова артилерія. У піхоти не було реальних засобів знищити танк, окрім як в упор. Почали з'являтися протитанкові рушниці. Але їх точність та пробивна спроможність дозволяла уражати лише легкоброньовану техніку та з невеликої відстані у кілька сотень метрів.

В цілому, пробивна здатність звичайного снаряду залежить від його швидкості, маси та міцності. Це автоматично позбавляло легке піхотне озброєння шансів. Тоді було розроблено кардинально новий тип снарядів – кумулятивні.

Кумулятивний снаряд [1] (рисунок 1.1) — снаряд зі специфічною структурою: детонатор на носі, воронка зроблена з спеціального матеріалу направлена у зворотній бік та вибухівка за нею. Під час вибуху з матеріалу облицювання цієї воронки у вибуховій речовині з'являється спрямований гарячий швидкий струмінь, направлений уздовж осі виїмки; при зустрічі з перешкодою струмінь створює великий тиск, що пробиває останню.

					ІА62.180БАК.005 ПЗ	Лист
						7
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		

Цей тиск значно перевищує межу міцності багатьох матеріалів, у тому числі і броні. Потужність і пробивна спроможність такого снаряда визначається кількістю і характеристиками вибухової речовини, формою кумулятивної воронки та матеріалом її облицювання. Найголовніше те, що пробивна здатність таких снарядів не залежить від їх швидкості польоту.

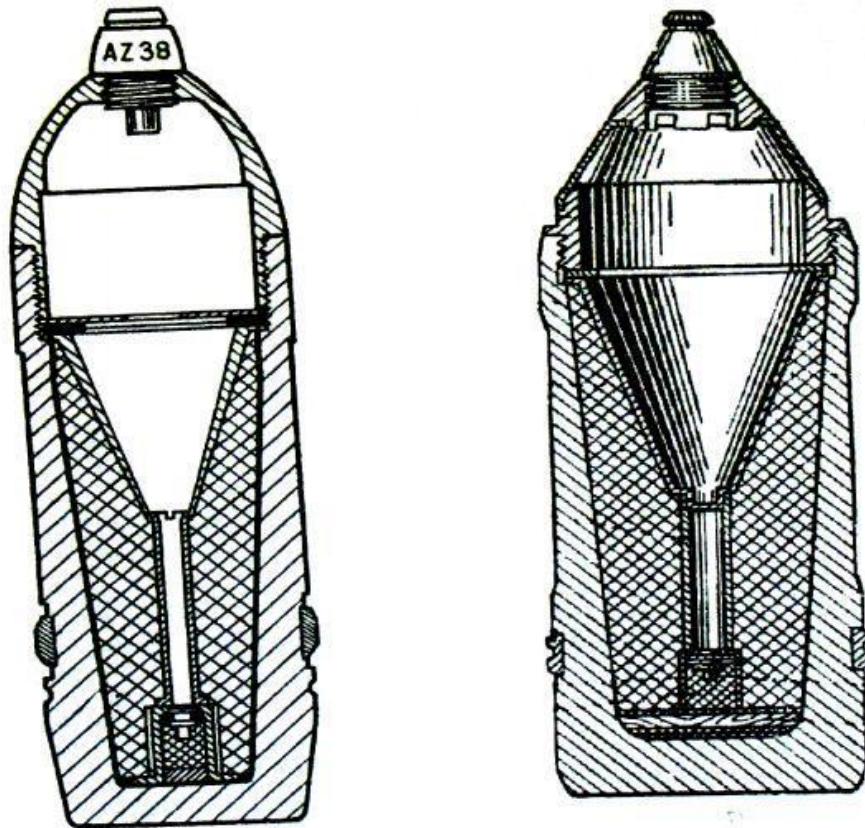


Рисунок 1.1 – Будова кумулятивного снаряду [1]

З появленням нового типу снарядів з'явилися і нові піхотні засоби боротьби з броньованою технікою: гранатомети. Вони, маючи невеликі порівняно з артилерією розміри та масу, забезпечували значну пробивну спроможність, хоча й невелику відстань роботи, через те що граната летіла за рахунок вибуху у пусковій установці.

Досить простий та легкий але дуже ефективний засіб боротьби з броньованою технікою активно продовжили модернізовувати.

Пізніше, у 60-х роках 20-ого сторіччя почали з'являтися перші протитанкові ракетні комплекси (ПТРК) (рисунок 1.2) [2]. Які вже стріляли не гранатою а

ракетою з кумулятивним зарядом. Це дозволило значно збільшити дистанцію роботи пристрою до кількох кілометрів.

Головною проблемою перед інженерами постало питання системи наведення таких ракет, оскільки влучити з великої відстані у рухому ціль некерованою ракетою майже неможливо.

Система наведення – сукупність пристроїв, які призначені керувати ракетою під час польоту.

Керування - цілеспрямований вплив на ракету, під час польоту, за допомогою сил і моментів, які створюються виконавчими органами системи управління ракетою; забезпечує її рух по заданій траєкторії.

Керування ракетою полягає в тому, щоб керувати рухом центру мас (керування; наведення); стабілізувати кутовий рух навколо центру мас (орієнтація) [3].



Рисунок 1.2 – ПТРК «Малютка» [2]

Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата

IA62.180БАК.005 ПЗ

Лист

9

ПТРК першого покоління мали найпростішу систему керування: в ракеті знаходилася котушка з дротом, який розмотується під час польоту. Оператор джойстиком керує ракетою, щоб та влучила в ціль.

Практика їх застосування показала їх значну ефективність але виявила необхідність значного допрацювання цього типу озброєння. Тоді були розроблені ПТРК 2 покоління (рисунок 1.3) [2]. Їх принципова відмінність полягає у тому, що тепер оператор лише вказує на ціль інфрачервоним променем, а ракета оснащена системою керування польотом за заданим променем. Це значно збільшило точність та дальність ефективної дії.



Рисунок 1.3 – ПТРК «TOW» [2]

У сучасних арміях усього світу ПТРК другого покоління з напівавтоматичною системою наведення складають основу засобів протитанкової боротьби для піхотних частин [2].

Їх головний недолік – оператор повинен тримати ціль у прицілі весь час польоту ракети. За цей час ворог може відкрити вогонь у відповідь.

Крім того, є багато засобів радіоелектронної боротьби, які можуть відхилити та перехопити ракету. Окремим рішенням є оптоволоконне наведення ракети в польоті за допомогою дроту, але це теж викликає певні проблеми з масою та габаритами.

Розвиток танків не стоїть на місці. Ще на початку 60х років 20 сторіччя почали робити композитну броню. Суть її полягає у шарах різної густини які накладені один на одного. Це значно ускладнює проходження кумулятивного струменя неї.

На поверхні броні стали кріпити вибухівку спрямованої дії. Так званий динамічний захист. Коли у нього влучає снаряд, захист детонує і або знищує, або відхиляє його.

Для подолання такого захисту використовують тандемні боеприпаси. Фактично це два кумулятивних заряди, які розташовані послідовно. Перший знищує захист, а другий пробиває основну броню. Такими почали робити і протитанкові ракети.

Координальним рішенням є ПТРК третього покоління. Ракета повинна бути оснащена такою системою наведення, яка не потребує втручання оператора під час роботи. Навідник лише вказує ракеті на ціль і, коли вона готова, робить постріл. Подальший її політ виконується повністю автоматично. Це дозволяє оператору змінити позицію, або перезарядитися та обрати нову ціль.

Велике застосування ПТРК в ролі зброї піхотних підрозділів призвело до ще одної істотної відмінності, а саме до оснащення бойової частини(БЧ). В наші дні ракети нових протитанкових комплексів можуть оснащуватися потужними тандемними кумулятивними БЧ і забезпечують пробиття на рівні 1000-1200 мм, БЧ запального (термобаричної) і фугасної дії, а також осколково-фугасними БЧ.

Створення передумов, завдань і критеріїв до розвитку нових ПТРК, які отримали в назві третє покоління, почалося під кінець семидесятих років минулого століття. У цей період електроніка і ракетні технології забезпечили можливість створення ПТРК, здатного самостійно виконувати частину необхідних функцій і розвантажити оператора.

					1A62.180БАК.005 ПЗ	Лист
						11
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		

Вважається, що головним критерієм третього покоління комплексів є наявність ракети з функцією «вистрілив і забув». При цьому інші характеристики і бойові якості відходять на другий план. Цьому визначенню третього покоління відповідає цілий ряд сучасних ПТРК розробки деяких передових країн.

Головною перевагою нових ПТРК є наявність повністю автономної головки самонаведення, здатної забезпечити ураження цілі без участі оператора. Завдяки цьому розрахунок може покинути позицію одразу після пострілу, не ризикуючи потрапити під вогонь у відповідь. Ручне або напівавтоматичне наведення ракети з такої точки зору ускладнює вирішення бойового завдання і призводить до певних ризиків.

Поява ракет системи «вистрілив і забув» прямо пов'язана з розвитком електроніки. Іншим результатом цього процесу стала поява нових функцій, таких як пошук і захоплення цілі в польоті або зміна цілі прямо на траєкторії. Крім того, завдяки розвитку електронних систем впроваджуються можливості роботи по зовнішньому вказуванню цілі, передачі польоту ракети під контроль іншої пускової установки.

Однак всі подібні плюси пов'язані з характерними мінусами. Сучасна ракета з розвиненою головкою самонаведення і засобами управління відрізняється високою вартістю.

З точки зору вартості виробництва і експлуатації ПТРК третього покоління помітно програють системам другого. У третьому поколінні складна електроніка є на пусковій установці і на ракеті.

Друге покоління передбачає використання дорогих складних систем керування тільки на установці, тоді як ракета спрощується і стає значно дешевше.

Часто виникає питання щодо доцільності використання нових ПТРК через те, що вартість їх ракети буває більша за вартість цілі, яку вона знищує.

					1A62.180БАК.005 ПЗ	Лист
						12
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		

1.2 Огляд існуючих рішень

Загалом, існують чотири основні типи керування ракетою:

- ручне наведення;
- телеуправління;
- самонаведення;
- автономне наведення.

Ручне наведення сьогодні не використовується в протитанкових ракетах, бо не відповідає поставленим вимогам та вже більше п'ятдесяти років розроблені більш сучасні системи наведення.

Телеуправління буває командне та за вказівним променем. В таких системах керування ракетою виконується за допомогою команд, які передаються з борту носія або установки, а ракета не приймає ніяких рішень і лише виконує завдання. В командних системах керування подається радіоканалом або оптоволоконним кабелем. У випадку вказання цілі променем – ракета має оптичну систему, яка сприймає промінь і наводить ракету за ним.

Система самонаведення має оптичну систему, яка сприймає випромінення цілі (електромагнітне або теплове) або відбите від неї. Така система слідкує за ціллю після обирання її оператором або комп'ютером та надсилає керуючі сигнали на приводи рулів ракети.

В автономних системах наведення усі засоби наведення та управління знаходяться в ракеті. Вона повністю автономно знаходить ціль за допомогою радару і приймає рішення, не потребуючи зв'язку з носієм або установкою.

Автономні системи наведення суттєво дорожчі за інші і не використовується в таких малих ракетах, як протитанкові. Це більше підходить для протиповітряних, протикорабельних, авіаційних, балістичних або космічних ракет.

Сьогодні серед протитанкових комплексів є дві найбільш популярні типи ракет: з лазерним наведенням та з інфрачервоними голівками самонаведення.

					1A62.180БАК.005 ПЗ	Лист
						13
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		

1.2.1 Лазерне наведення ракети

В лазерних системах наведення носієм інформації для коригування курсу польоту ракети виступає випромінювання лазера (рисунок 1.4). Дія таких систем заснована на основних властивостях лазера – створювати вузькоспрямоване, монохроматичне (певної частоти) випромінювання у широкому спектрі. Завдяки цьому досягається висока скритність такої системи до протидії [4].

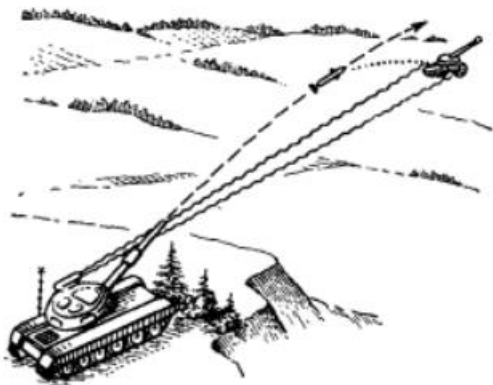


Рисунок 1.4 – Наведення ракети лазером [4]

Також додатковою перевагою є те, що лазерний випромінювач може знаходитись де завгодно, не обов'язково на пусковій установці. Наприклад, ракету запущено з великої відстані, або без прямої видимості цілі, а літальний апарат або людина підсвічує ціль лазером з іншої позиції.

Перевагою над системою самонаведення є простота ракети, що значно зменшує її вартість. А недоліком є те, що ціль потрібно тримати в прицілі лазера весь час польоту ракети.

Також в сучасному світі часто застосовують технології, які дозволяють виявити, чи наведено на вас лазер і звідки. Це дає деяку можливість ухилитися, а потім відкрити вогонь у відповідь[5].

Загалом усі сучасні армії світу поступово відходять від протитанкових ракет з лазерним наведенням на самонаведення.

1.2.2 Ракета з головою самонаведення

Основними складовими функціонування системи самонаведення є два блоки:

- датчик певної фізичної величини, який прямо або опосередковано пов'язаний з положенням цілі;
- автопілот - система, яка обробляє дані з датчика та висилає керуючі сигнали на виконавчі органи ракети.

Ймовірно, найбільш відомим ПТРК третього покоління з системою наведення є комплекс FGM-148 Javelin (рисуюнок 1.5) [2,6], розроблений в Сполучених Штатах Америки, який працює за принципом «вистрілив і забув». Цей комплекс почали створювати у восьмидесятих роках двадцятого сторіччя і в 1996 прийняли на озброєння армії США. Також він поставляється іншим країнам. До сьогодні, FGM-148 неодноразово використовувалися в умовах реальних бойових дій і показав свою високу ефективність [6].

Ракета ПТРК «Джавелін» оснащена інфрачервоною головою самонаведення з охолоджувальною матрицею. Ракета створена для супроводження та ураження теплоконтрастної цілі. Це дозволяє вразити будь-яку техніку або літальний апарат на низькій висоті.

Ракета має два режими польоту: прямий, який більше підходить проти споруд та літальних апаратів; та атака зверху, коли ракета летить на певній висоті приблизно 150 метрів а потім пікірує на ціль, цей варіант краще підходить для танків, оскільки зверху їхня броня найтонша.

Також, ракета оснащена двома двигунами, які забезпечують «м'який старт». Перший двигун є викидним та безпечно виштовхує ракету з пускової установки на кілька метрів, а лише потім запускається основний двигун. Це допомагає вести вогонь з будівель або напівзакритих позицій, не створюючи слухового удару операторам.

Одною з головних переваг також є його портативність. Приблизно 23 кг – залежить від конкретної модифікації. Отже немає обов'язкової необхідності

					1A62.180БАК.005 ПЗ	Лист
						15
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		

встановлювати його на техніку. Його цілком реально можуть переносити і використовувати піхотинці.



Рисунок 1.5 – ПТРК «Джавелін» [6]

Дуже довго вважалося, що з танками можна боротися лише танками. Усі інші варіанти приречені на поразку або на величезні втрати. Цей ПТРК довів зворотне. Вдалі застосування ракет комплексу «Джавелін» на близькому та середньому сході показали, що легкоозброєні піхотні частини з таким озброєнням можуть дуже вдало дати відсіч ворожим танкам.

1.3 Висновок першого розділу

Після аналізу існуючих систем наведення і керування ракетами, їх переваг та недоліків, розглянутих прикладів конкретних чинних зразків кращих армій світу, прийнято рішення розробляти систему наведення для ракети типу ПТРК «Джавелін» за принципом «вистрілив і забув».

В голові ракети буде розміщуватися роторний гіроскоп з інфрачервоною голівкою самонаведення з охолоджувальною матрицею чутливих до теплового випромінювання елементів. Такий пристрій буде слідкувати за випромінюванням цілі та видавати керуючі сигнали в систему керування.

Така ракета буде дорожча за ракету з лазерним наведенням, але матиме багато важливих переваг:

- мобільність;
- універсальність;
- широка варіативність застосування;
- скритність - помітити захоплення цілі такою ракетою значно складніше, ніж при наведенні лазером або іншим радіовипромінювальним пристроєм, що значно зменшує вірогідність та ефективність постановки радіоперешкод та збільшує вірогідність ураження [5];

- маневреність;
- безпека особового складу підрозділів боротьби із броньованими цілями.

					ІА62.180БАК.005 ПЗ	Лист
						17
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		

2 ОПИС СИСТЕМИ НАВЕДЕННЯ РАКЕТИ

2.1 Опис пристрою

Для виконання завдання самонаведення протитанкові керовані ракети оснащуються інфрачервоною головкою самонаведення. Вона представляє собою оптико-електронний прилад, призначений для індикації цілі на навколишньому фоні і видачі в апаратуру управління сигналу захоплення, а також для вимірювання і видачі в автопілот сигналу кутової швидкості лінії візування [7].

Схему ракети «Джавелін» наведено на кресленнику ІА62.180БАК.005 ОВ.

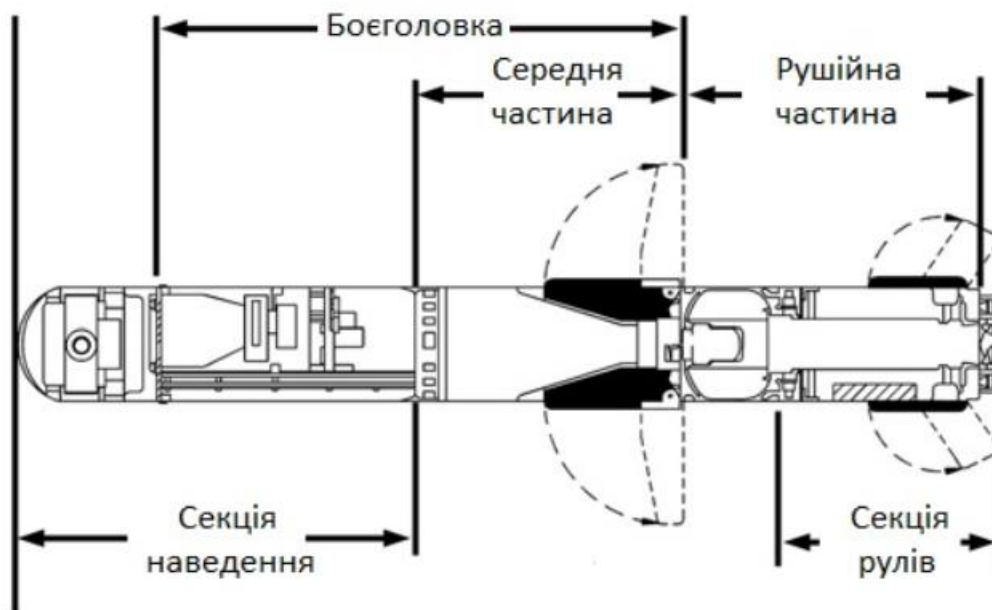


Рисунок 2.1 – Будова ракети ПТРК «Джавелін» [6]

На рисунку 2.1 позначені наступні частини ракети (зліва направо): секція наведення, боєголовка, середня частина з викидними крилами-стабілізаторами, рушійна частина з двигунами, секція рулів ракети.

Оптична система такої інфрачервоної головки представляє собою дзеркально-лінзовий об'єктив, встановлений на роторі гіроскопа і обертається разом з ним, збирає теплове випромінювання – інфрачервоні хвилі, що випромінюється ціллю, у фокальній площині об'єктиву.

Оптика виконана як фільтр і пропускає лише хвилі інфрачервоного спектру. Сформований таким чином сигнал від цілі надходить до оптичної системи, яка збирає, формує потік випромінювання і направляє його на площини фотоприймального пристрою (ФПП) (рисунок 2.2). Приймач випромінювання перетворює променеву енергію в електричний сигнал по двох каналах [8].

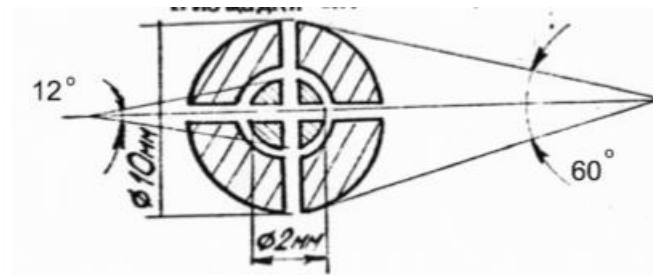


Рисунок 2.2 – Будова площадок ФПП [8]

ФПП складається з:

- матриці з восьми площадок формату $300 \cdot 300$ з розміром чутливих елементів $35 \cdot 35$ мікрометрів (4 внутрішні майданчики діаметром 2 мм забезпечують поле зору до 12 градусів, а 4 периферійні, діаметром 10 мм, забезпечують поле зору від 12 до 60 градусів) ;
- і восьми вбудованих підсилювачів.

При підльоті ракети до цілі (приблизно за 3 км) випромінювання від цілі збирається об'єктивом головки в фокальній площині. Оскільки площа чутливих майданчиків ФПП зміщена щодо фокальній площині об'єктива, ціль проєктується на площину майданчиків ФПП у вигляді світлової плями.

Сьогодні використовують інфрачервоні головки слідкуючого типу. Сигнали з площин через підсилювач йдуть на котушки корекції гіроскопу, які довертають гіроскоп з фотоприймальним пристроєм у бік цілі. Також ці електричні сигнали йдуть на підсилювачі та потім рулі ракети. Вони повертають ракету, керуючи її кутовою швидкістю [9].

Відповідно до викладених концепцій створення протитанкового ракетного комплексу нового покоління в дипломному проєкті пропонується протитанкова керована ракета з системою самонаведення, що реалізує метод пропорційної навігації.

Лінія візування цілі – лінія яка поєднує ракету та ціль.

Для реалізації методу пропорційної навігації необхідно, щоб напрямок осі головки самонаведення постійно збігався з напрямком лінії візування цілі, а вісь ракети була спрямована у напрямку осі головки.

Будова головки самонаведення наведена на кресленику ІА62.180БАК.005 ОВ.

В головці самонаведення використовується роторний гіроскоп. Оптична система ФПП та матриці знаходяться на роторі. Основна властивість такого гіроскопу полягає у тому, що він зберігає в просторі напрямок осі обертання незмінним

Перед пуском, після захоплення цілі, гіроскоп розкручується до п'ятнадцяти тисяч обертів на хвилину так, щоб напрям осі обертання збігався з ціллю. Таким чином система керування знає про початкове знаходження цілі.

2.2 Опис структурної схеми системи наведення ракети

Креслення схеми електричної структурної у великому форматі наведено в ІА62.180БАК.003 Э1.

Система складається з наступних елементів:

- командно-пусковий блок (КПБ);
- ракета;
- змінне джерело живлення(ЗДЖ).

ГСН – головка самонаведення.

КПБ – складається з монітору, кнопок керування, оптики, камер, прицілів та пускової труби, в яку вставляється ракета.

Змінне джерело живлення подає напругу на КПБ та ракету.

					ІА62.180БАК.005 ПЗ	Лист
						20
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		

В системі присутні три контури.

Контур КПБ-ракета – оператор обирає ціль та робить налаштування, які передаються в ракету, ракета передає сигнал про стан своєї готовності.

Контур ЗДЖ-КПБ – джерело живлення живить бортовий комп'ютер та усі системи комплексу.

Контур ЗДЖ-ракета – живить ракету електричною енергією, поки вона знаходиться в пусковій установці. Після пуску за живлення ракети відповідає її власний бортовий акумулятор.

Робота комплексу перед пуском проходить за певним алгоритмом [7]:

- вибір цілі оператором через приціл КПБ та формування шаблону;
- перемикання на інфрачервону головку ракети та зйомка цілі вже в інфрачервоному спектрі для формування регіону інтересу;
- обирається варіант атаки: прямий чи зверху;
- комп'ютер КПБ за допомогою камер оцінює відстань, горизонт ракети та початкову траєкторію;
- потім комп'ютер виконує функцію кореляційного аналізу прикладаючи шаблон до регіону інтересу і, якщо картинки «схожі», з'являються кореляційні сплески – ракета готова до пуску.

Під час польоту ракети, інфрачервоне випромінення цілі попадає в оптику головки та на чутливі матриці. Якщо пляма зібраного випромінення знаходиться не по центру матриці – керуючі сигнали довертають гіроскоп у протилежну сторону, щоб ціль знаходилася посередині. Повернення гіроскопу видає сигнал на рулі корекції і довертає ракету у напрямку цілі.

2.3 Опис функціональної схеми системи наведення ракети

Креслення схеми електричної функціональної у великому форматі наведено в ІА62.180БАК.004 Э2.

					ІА62.180БАК.005 ПЗ	Лист
						21
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		

В системі присутні два електронно обчислювальні пристрої (ЕОП) ЕОП1 - в КПБ та ЕОП2 - в ракеті.

ЕОП1 відповідає за вимірювання відстані, розрахунок траєкторії, відображення даних на моніторі та передачу даних на ракету перед її пуском.

ЕОП2 виконує функцію кореляційного аналізу зображення від ФПП та шаблону від КПБ, видає керуючі електричні сигнали на двигуни та рулі ракети та керує детонацією.

В ЕОП2 вбудовано регулятор, який забезпечує стабільне значення кутової швидкості ракети.

ФПП фактично виконує функцію датчика кута відхилення, а сигнал з гіроскопу дає розрахункове значення, на який кут треба повернути ракету.

В одних випадках заряд треба активувати на деякій відстані від цілі, а в інших - під час зіткнення (прямого влучення). Тому для різних сценаріїв атаки цілі в ракеті знаходяться датчики: контактний та неконтактний. Неконтактний датчик видає сигнал, коли ракета підлітає на відстань 2 м до цілі, контактний - коли відстань до цілі менше 10 см.

Інфрачервона головка самонаведення у звичайних умовах працювати не зможе. Тому перед роботою вмикається охолодження стисненим газом аргоном для підвищення чутливості приймача. Охолоджувач вистачає приблизно на 5 хвилин роботи. Якщо ракета не була запущена – потрібно замінити охолоджувач. Поки ракета знаходиться на установці, використовується охолоджувач ЗДЖ. Під час польоту використовується власний охолоджувач ракети.

Для реалізації «м'якого» старту, коли ракета спочатку вилітає з установки, а потім запускається основний двигун, щоб не оглушити операторів, існують два двигуни – стартовий і маршевий. Стартовий двигун на рахунок порохового заряду викидає ракету на декілька метрів вперед, а за цей час запускається основний маршевий твердопаливний двигун, який доводить її до цілі.

В системі перед виконавчими органами знаходиться цифро-аналоговий перетворювач, оскільки на двигуни та рулі потрібно подавати аналогові сигнали.

					1A62.180БАК.005 ПЗ	Лист
						22
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		

2.4 Висновок другого розділу

Для обраної ракети типу ПТКР «Джавелін» розглянуто загальну будову та описано принцип її дії. Наведення на ціль виконується за допомогою головки самонаведення, в якій міститься оптичний приймач та матриця чутливих до інфрачервоного випромінення елементів в гіроскопі.

Наведення виконується за методом пропорційної навігації, керуючі імпульси з матриці йдуть на котушки корекції гіроскопу, який довертає матрицю на ціль. Ці ж імпульси йдуть на рулі ракети для зміни кутової швидкості так, щоб вісь ракети співпадала з віссю гіроскопу.

Розроблені електрична структурна та функціональна схеми комплексу описують складові системи наведення протитанкової ракети. Загалом система складається з трьох основних елементів: ракета, командно-пусковий блок та змінне джерело живлення.

Ракета отримує початкові дані до польоту від командно пускового блоку, де оператор обирає ціль та вид атаки. Змінне джерело живлення живить систему до запуску, а під час польоту в ракеті використовується власний акумулятор.

Після захоплення цілі, розкручується гіроскоп так, щоб його вісь обертання співпадала з напрямом на ціль. В польоті котушки корекції корегують напрям осі гіроскопу, якщо ціль рухається. Система керування знаючи положення осі ракети та осі гіроскопу має кут помилки і видає керуючі сигнали на рулі.

					1A62.180БАК.005 ПЗ	Лист
						23
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		

3 РОЗРОБЛЕННЯ МОДЕЛІ ЦИФРОВОЇ СИСТЕМИ НАВЕДЕННЯ ПРОТИТАНКОВОЇ РАКЕТИ

3.1 Виведення математичної моделі об'єкту керування

Для реалізації метода пропорційної навігації виконується керування кутовою швидкістю ракети під час польоту, тож використовуємо диференціальне рівняння залежності кутової швидкості (ω) від керуючого моменту рулів (δ) [10,11].

$$T_2^2 \ddot{\omega} + 2T_2 E \dot{\omega} + \omega = T_1 \dot{\delta} + \delta \quad (3.1)$$

$$T_2 = \sqrt{\frac{4mJ}{\rho V^2 d^3}} \quad (3.2)$$

$$T_1 = \frac{4m}{\rho V C}, \quad (3.3)$$

де ω – кутова швидкість;

δ – керуючий момент рулів;

m – маса ракети;

J – момент інерції;

ρ – середня густина повітря;

V – швидкість ракети;

d – діаметр ракети;

C – коефіцієнт підйомної сили рулів;

E – коефіцієнт керуючих моментів.

Обрані фізичні параметри наведено в таблиці 3.1.

Таблиця 3.1 – Фізичні параметри моделі

Величина	Значення	Одиниці виміру
m	10,128	кг
J	0,7724	кг*м ²
ρ	1,1839	кг*м ³
V	218	$\frac{м}{с}$
d	0,127	м
C	0,38	1
E	2,2865	1

Тоді:

$$T_2 = \sqrt{\frac{4 * 10,128 * 0,7724}{1,1839 * 218^2 * 0,127^3}} = \sqrt{0,2715} = 0,5211$$

$$T_1 = \frac{4 * 10,128}{1,1839 * 218 * 0,38} = 0,413$$

$$2 * E * T_2 = 2,383$$

Тоді рівняння приймає вигляд:

$$0,2715 * \ddot{\omega} + 2,383 * \dot{\omega} + \omega = 0,413 * \dot{\delta} + \delta \quad (3.4)$$

Перетворенням Лапласа, або зображенням функції оригіналу $f(t)$ називається певне інтегральне перетворення у функцію $F(s)$:

$$F(s) = \int_0^{+\infty} e^{-st} f(t) dt \quad (3.5)$$

Для перетворення похідних застосуємо теорему про диференціювання оригіналу:

$$f'(t) = S * F(s) - f(0) \quad (3.6)$$

$$f''(t) = S^2 * F(s) - S * f(0) - f'(0) \quad (3.7)$$

Запишемо (ω) як (y), а (δ) як (x) та виконуємо перетворення Лапласа:

$$0,2715 * S^2 * Y(s) + 2,383 * S * Y(s) + Y(s) = 0,413 * S * X(s) + X(s)$$

Виділяємо $Y(s)$ та $X(s)$, скорочуємо обидві частини на $X(s)$ і на множник $Y(s)$:

$$Y(s) * (0,2715 * S^2 + 2,383 * S + 1) = X(s) * (0,413 * S + 1)$$

Передавальної функцією $W(s)$ називається відношення зображення виходу функції до зображення її входу [12].

$$W(S) = \frac{Y(s)}{X(s)} = \frac{(0,413 * S + 1)}{(0,2715 * S^2 + 2,383 * S + 1)} \quad (3.8)$$

Для оцінки реакції систем на вхідний вплив використовують перехідний процес.

Перехідний процес – реакція динамічної системи на вхідний вплив (одиничний стрибок), відображає зміну координат до певного сталого значення, якщо система стійка. Він є важливим кроком в дослідженні характеристик та якості системи, що розглядається.

Моделюємо перехідний процес системи керування ракетою в програмному пакеті Matlab Simulink (рисунок 3.1).

В модель додано інтегратор ($1/S$), оскільки передавальна функція відображає зміну кутової швидкості, а потрібно спостерігати за кутом відхилення. Оскільки кутова швидкість є похідною за часом від функції кута повороту, то інтегрування першої призводить до отримання другої.

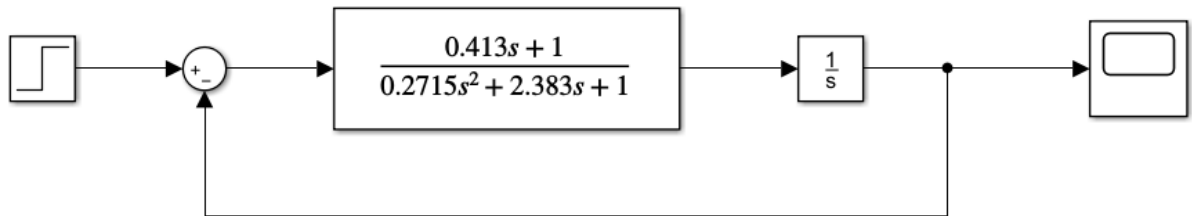


Рисунок 3.1 – Модель перехідного процесу неперервної системи

Результати моделювання перехідного процесу наведено на рисунку 3.2.

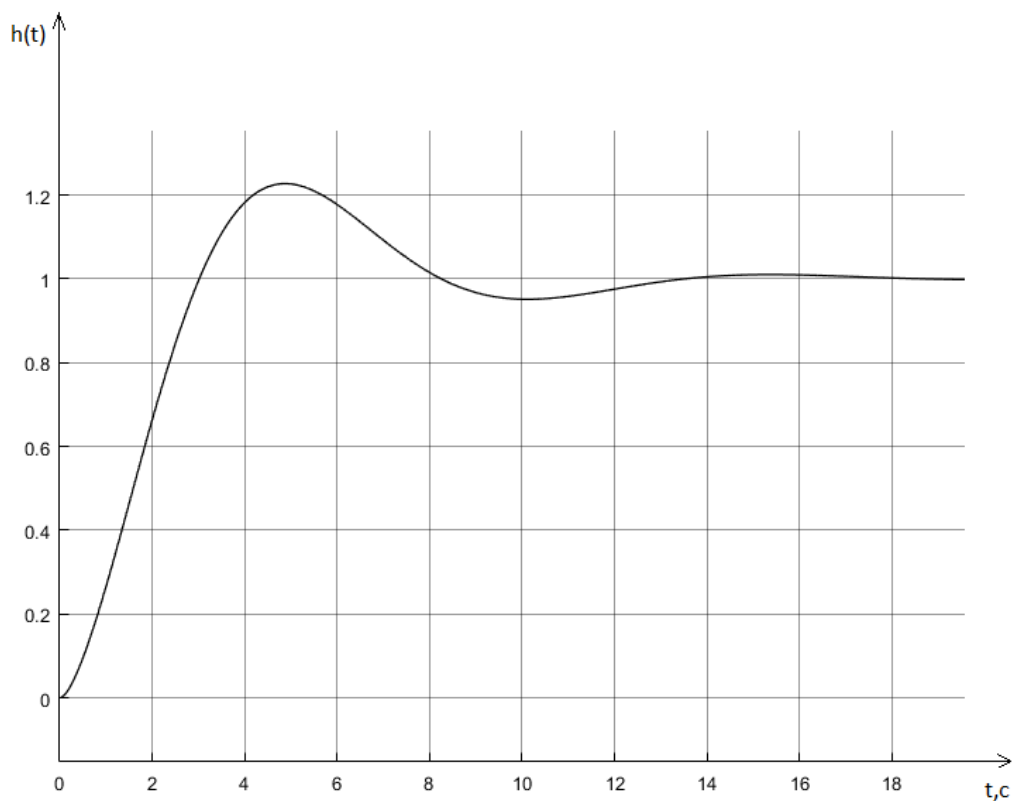


Рисунок 3.2 – Графік перехідного процесу системи

3.2 Виведення цифрової передавальної функції системи

Цифрова система – система, що має в своєму складі цифрові обчислювальні пристрої. Значення такої системи знімається у дискретні моменти часу та не існує інформації між ними.

Для того, щоб перейти від неперервної функції системи до цифрової, виконується z-перетворення. Оскільки воно базується на умові послідовності імпульсів, отже справедливо лише тоді, коли час квантування менше основної постійної часу передавальної функції неперервної системи. Система повинна мати нулів на 1 менше ніж полюсів – ступень знаменника повинна бути більше, ніж чисельника. Час квантування обрано $T=0.1\text{с}$.

Z-перетворення неперервної функції виконується за наступною формулою:

$$W(z) = \frac{z-1}{z} * Z \left\{ \frac{W(s)}{S} \right\} \quad (3.9)$$

$$W(z) = \frac{z-1}{z} * Z \left\{ \frac{0,413 * S + 1}{0,2715 * S^4 + 2,383 * S^3 + S^2} \right\}$$

Використовуємо наступні формули для Z-перетворення:

$$\frac{1}{S} = \frac{z}{z-1} \quad (3.10)$$

$$\frac{1}{S^2} = \frac{Tz}{(z-1)^2} \quad (3.11)$$

$$\frac{1}{S+a} = \frac{z}{z-e^{-aT}} \quad (3.12)$$

Для застосування цих формул треба розкласти дріб на суму простих дробів.
Розкладаємо знаменник дробу на прості множники. Розглянемо многочлен:

$$0,2715 * S^4 + 2,383 * S^3 + S^2 = S^2 * (0,2715 * S^2 + 2,383 * S + 1)$$

Знаходимо дискримінант та корені многочлену:

$$D = b^2 - 4 * a * c = (2,383)^2 - 4 * 0,2715 * 1 = 4,5927$$

$$S = \begin{cases} \frac{-b + \sqrt{D}}{2a} \\ \frac{-b - \sqrt{D}}{2a} \end{cases} = \begin{cases} \frac{-2,383 + 2,1431}{2 * 0,2715} \\ \frac{-2,383 - 2,1431}{2 * 0,2715} \end{cases} = \begin{cases} -0,442 \\ -8,335 \end{cases}$$

$$S^2 * (0,2715 * S^2 + 2,383 * S + 1) = 0,2715 * S^2 * (S + 0,442) * (S + 8,335)$$

Поділимо чисельник та знаменник на 0,2715:

$$W(z) = \frac{z - 1}{z} * Z \left\{ \frac{3,6832 * (0,413 * S + 1)}{S^2 * (S + 0,442) * (S + 8,335)} \right\}$$

Застосуємо метод невизначених коефіцієнтів для розкладання дробу на прості дробі:

$$\frac{3,6832 * (0,413 * S + 1)}{S^2 * (S + 0,442) * (S + 8,335)} = \frac{A}{S} + \frac{B}{S^2} + \frac{C}{S + 0,442} + \frac{D}{S + 8,335}$$

Зводимо прості дробі до спільного знаменника:

$$\frac{A}{S} + \frac{B}{S^2} + \frac{C}{S + 0,442} + \frac{D}{S + 8,335} =$$

$$= \frac{A * S * (S + 0,442) * (S + 8,335) + B * (S + 0,442) * (S + 8,335) +}{S^2 * (S + 0,442) * (S + 8,335)}$$

$$+ \frac{C * S^2 * (S + 8,335) + D * S^2 * (S + 0,442)}{S^2 * (S + 0,442) * (S + 8,335)}$$

Прирівнюємо чисельники початкового дробу та зведеного нового та обчислюємо невідомі коефіцієнти:

$$A * S * (S + 0,442) * (S + 8,335) + B * (S + 0,442) * (S + 8,335) + C * S^2 * (S + 8,335) + D * S^2 * (S + 0,442) = 3,6832 * (0,413 * S + 1)$$

Підставимо певні значення S, нехай S=0, тоді:

$$B * (0 + 0,442) * (0 + 8,335) = 3,6832 * (0 + 1)$$

$$B = \frac{3,6832}{0,442 * 8,335} = 1$$

$$S = -0,442: C * (-0,442)^2 * (8,335 - 0,442) = 3,6832 * (0,413 * (-0,442) + 1)$$

$$C = \frac{3,6832 * 0,8175}{1,6284} = 1,9521$$

$$S = -8,335: D * (-8,335)^2 * (0,442 - 8,335) = 3,6832 * (0,413 * (-8,335) + 1)$$

$$D = \frac{3,6832 * (-2,4424)}{-548,34} = 0,0166$$

S= 1:

$$A * 1 * 1,442 * 9,335 + 1 * 1,442 * 9,335 + 1,9521 * 1 * 9,335 + 1 * 0,0166 * 1,442 = 3,6832 * 1,413$$

					IA62.180БАК.005 ПЗ	Лист
						30
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		

$$A = \frac{3,6832 * (-7,1944)}{13,461} = -1,9687$$

Маємо таке розкладання на прості дробі:

$$\frac{3,6832 * (0,413 * S + 1)}{S^2 * (S + 0,442) * (S + 8,335)} = \frac{-1,9687}{S} + \frac{1}{S^2} + \frac{1,9521}{S + 0,442} + \frac{0,0166}{S + 8,335}$$

$$W(z) = \frac{z-1}{z} * Z \left\{ \frac{-1,9687}{S} + \frac{1}{S^2} + \frac{1,9521}{S + 0,442} + \frac{0,0166}{S + 8,335} \right\}$$

Використовуємо формули z-перетворень простих дробів:

$$\frac{-1,9687}{S} = \frac{(-1,9687) * z}{z-1}$$

$$\frac{1}{S^2} = \frac{0,1 * z}{(z-1)^2}$$

$$\frac{1,9521}{S + 0,442} = \frac{1,9521 * z}{z - e^{-0,0442}}$$

$$\frac{0,0166}{S + 8,335} = \frac{0,0166 * z}{z - e^{-0,8335}}$$

Підставляємо в функцію W(z):

$$\begin{aligned} W(z) &= \frac{z-1}{z} * \left(\frac{(-1,9687) * z}{z-1} + \frac{0,1 * z}{(z-1)^2} + \frac{1,9521 * z}{z - e^{-0,0442}} + \frac{0,0166 * z}{z - e^{-0,8335}} \right) = \\ &= \frac{z-1}{z} * \frac{(-1,9687) * z * (z-1) * (z - e^{-0,0442}) * (z - e^{-0,8335}) +}{(z-1)^2 * (z - e^{-0,0442}) * (z - e^{-0,8335})} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& \frac{+0,1 * z * (z - e^{-0,0442}) * (z - e^{-0,8335}) + 1,9521 * (z - 1)^2 * (z - e^{-0,8335}) +}{+0,0166 * (z - 1)^2 * (z - e^{-0,0442})} = \\
& = \frac{(-1,9687) * (z - 1) * (z - 0,9568) * (z - 0,4345) +}{(z - 1) * (z - 0,9568) * (z - 0,4345)} \\
& \frac{+0,1 * (z - 0,9568) * (z - 0,4345) + 1,9521 * (z^2 - 2z + 1) * (z - 0,4345) +}{+0,0166 * (z^2 - 2z + 1) * (z - 0,9568)} = \\
& = \frac{-1,9587z^3 + 2,7391z^2 - 0,8188z + 1,9687z^2 - 2,7381z + 0,8188 + 0,1z^2 -}{(z - 1) * (z - 0,9568) * (z - 0,4345)} \\
& \frac{-0,13913z + 0,04157 + 1,9521z^3 - 3,9042z^2 + 1,9521z - 0,8482z^2 +}{+1,6964z - 0,8482 + 0,0166z^3 - 0,0332z^2 + 0,0166z -} \\
& \frac{-0,0159z^2 + 0,0318z - 0,0159}{W(z) = \frac{0,0063z^2 - 0,00013z - 0,00373}{(z - 1)(z^2 - 1,3913z + 0,4157)}} \quad (3.13)
\end{aligned}$$

Розрахунок z-перетворення у середовищі командного рядка Matlab. Вводимо функцію неперервної частини, та оцифруємо її командою c2d з часом квантування 0.1с (рисунок 3.3) [13].

```
>> w=tf([0.413 1],[0.2715 2.383 1 0])

w =

          0.413 s + 1
-----
    0.2715 s^3 + 2.383 s^2 + s

Continuous-time transfer function.

>> wz1=c2d(w,0.1)

wz1 =

    0.006277 z^2 + 0.0001635 z - 0.003996
-----
          z^3 - 2.391 z^2 + 1.807 z - 0.4157

Sample time: 0.1 seconds
Discrete-time transfer function.
```

Рисунок 3.3 – Z-перетворення в командному рядку Matlab

Фіксатор нульового порядку – елемент який тримає ординату функції на час квантування. Фактично показує, як повинна виглядати початкова функція після дискретизації з відповідним часом квантування.

На моделі в середовищі Matlab Simulink порівнюємо три функції: неперервну з фіксатором нульового порядку, розраховану в командному рядку та розраховану аналітичним методом особисто (рисунок 3.4).

Тепер порівнюємо графіки, щоб перевірити адекватність досліджуваних моделей (рисунок 3.5).

Як бачимо, з точністю до 0,0001 графіки співпадають. Ця похибка пов'язана з округленням 5-ого знаку після коми в коефіцієнтах функцій при дискретизації.

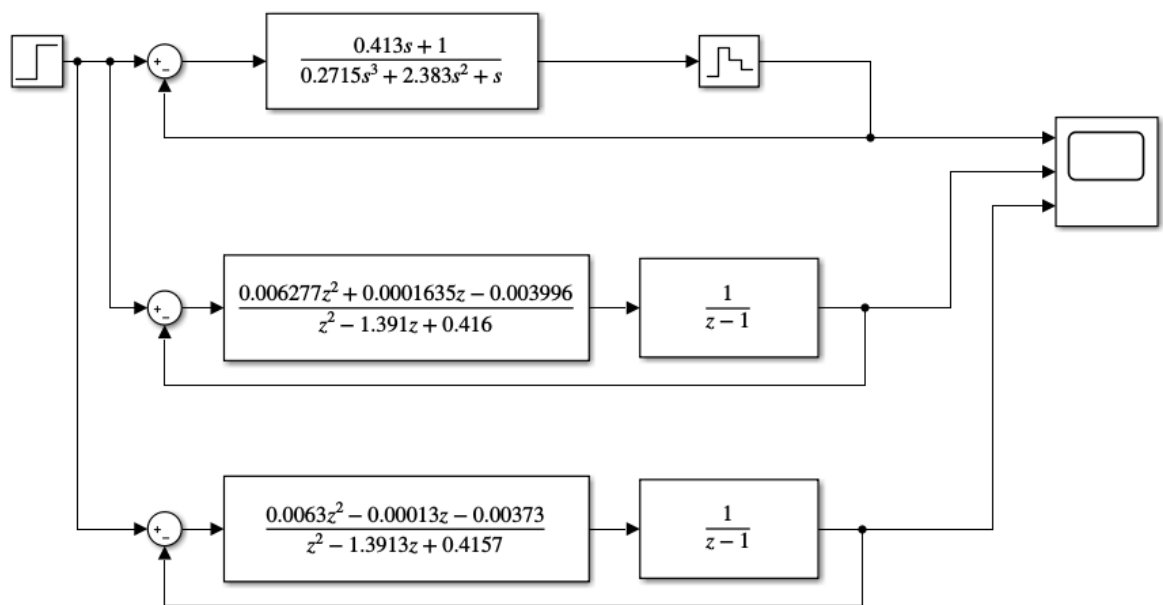


Рисунок 3.4 – Схема порівняння моделей

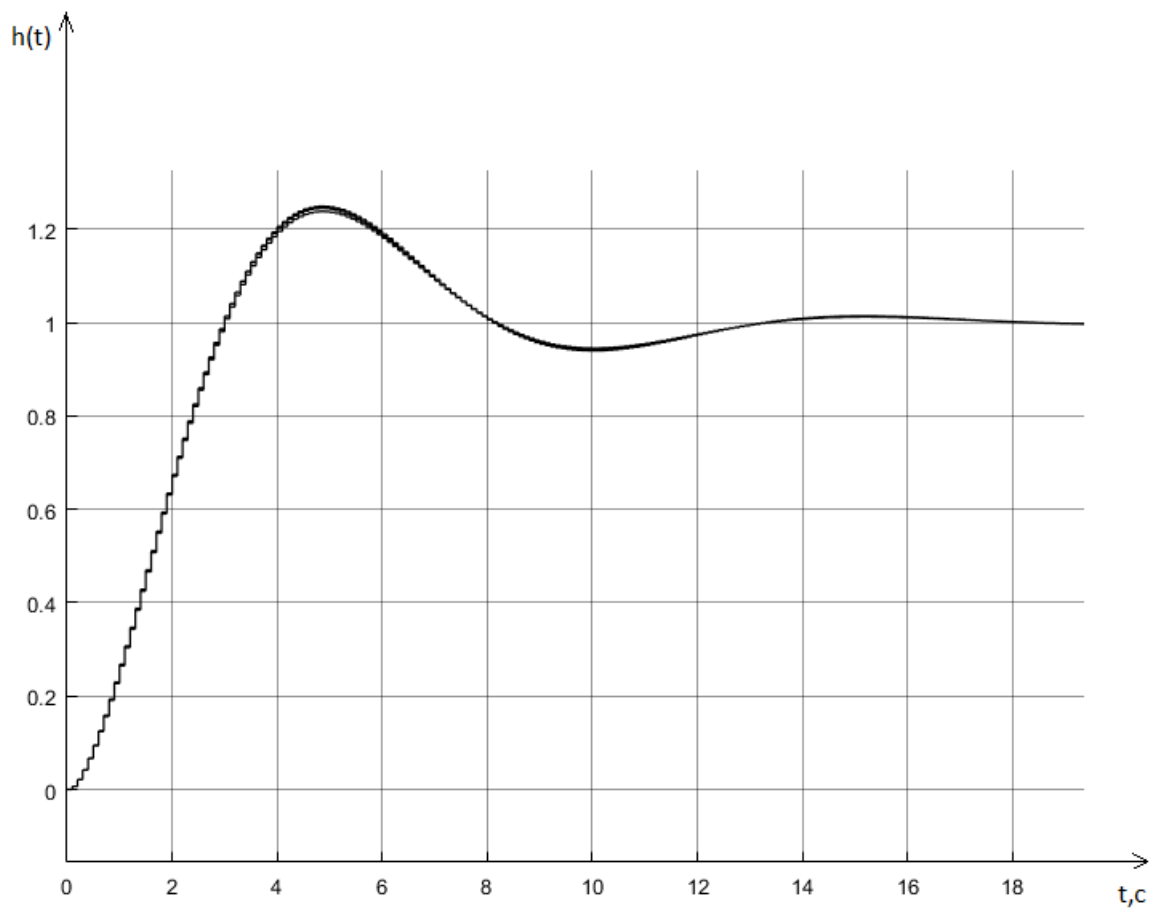


Рисунок 3.5 – Графіки перехідних процесів порівнюваних моделей

3.3 Висновок третього розділу

Розроблено математичну модель системи наведення протитанкової ракети. Виведено передавальну функцію неперервної системи наведення протитанкової ракети:

$$W(S) = \frac{Y(s)}{X(s)} = \frac{(0,413 * S + 1)}{(0,2715 * S^2 + 2,383 * S + 1)}$$

Виконано перехід до цифрової передавальної функції аналітичним методом та у програмному пакеті Matlab.

Виконано порівняння отриманих цифрових моделей з початковою неперервною для перевірки їх правильності та обирання найбільш точної.

Виведено цифрову передавальну функцію системи наведення протитанкової ракети:

$$W(z) = \frac{0,0063z^2 - 0,00013z - 0,00373}{(z - 1)(z^2 - 1,3913z + 0,4157)}$$

4 АНАЛІЗ ЦИФРОВОЇ СИСТЕМИ НАВЕДЕННЯ ПРОТИТАНКОВОЇ РАКЕТИ

4.1 Стійкість цифрової системи

Для визначення стійкості, потрібно вивести функцію замкненої цифрової системи $W_3(z)$ [12,13].

$$W(z) = \frac{0,0063z^2 - 0,00013z - 0,00373}{(z-1)(z^2 - 1,3913z + 0,4157)}$$

$$W_3(z) = \frac{W(z)}{1 + W(z)} \quad (4.1)$$

$$W_3(z) = \frac{\frac{0,0063z^2 - 0,00013z - 0,00373}{(z-1)(z^2 - 1,3913z + 0,4157)}}{1 + \frac{0,0063z^2 - 0,00013z - 0,00373}{(z-1)(z^2 - 1,3913z + 0,4157)}} =$$

$$= \frac{\frac{0,0063z^2 - 0,00013z - 0,00373}{(z-1)(z^2 - 1,3913z + 0,4157)}}{\frac{(z-1)(z^2 - 1,3913z + 0,4157) + 0,0063z^2 - 0,00013z - 0,00373}{(z-1)(z^2 - 1,3913z + 0,4157)}} =$$

$$= \frac{0,0063z^2 - 0,00013z - 0,00373}{z^3 - 1,3913z^2 + 0,4157z - z^2 + 1,3913z - 0,4157 +$$

$$+ 0,0063z^2 - 0,00013z - 0,00373}$$

$$W_3(z) = \frac{0,0063z^2 - 0,00013z - 0,00373}{z^3 - 2,385z^2 + 1,8069z - 0,41943} \quad (4.2)$$

Характеристичне рівняння системи $D(z)$ – знаменник дробу цифрової передавальної функції замкненої системи.

Загальна умова стійкості цифрової системи – для того щоб система була стійкою, необхідно і достатньо, щоб корені характеристичного рівняння лежали в колі одиничного радіусу на комплексній площині, тобто за модулем були менше одиниці.

Комплексна площина – система двох координат для комплексних чисел. Оскільки вони мають дві частини – реальну та уявну – то їх використовують як координати. Дійсні числа не мають уявної складової та знаходяться на реальній осі.

Для цього потрібно знайти корені характеристичного рівняння:

$$D(z) = z^3 - 2,385z^2 + 1,8069z - 0,41943 \quad (4.3)$$

Для цього треба розв'язати кубічне рівняння:

$$z^3 - 2,385z^2 + 1,8069z - 0,41943 = 0$$

Робимо заміну змінної: $z = x - b/3a = u + 0,795$

$$(u + 0,795)^3 - 2,385(u + 0,795)^2 + 1,8069(u + 0,795) - 0,41943 = 0$$

$$u^3 + 2,835u^2 + 1,8961u + 0,5025 - 2,385u^2 - 3,7922u - 1,5074 + \\ + 1,8069u + 1,4365 - 0,41943 = 0$$

$$u^3 - 0,0892u + 0,0122 = 0$$

Тепер робимо підстановку Вієта: $u = t + 0,029725/t$

$$(t + \frac{0,029725}{t})^3 - 0,0892(t + \frac{0,029725}{t}) + 0,0122 = 0$$

$$t^3 + \frac{3 * t^2 * 0,029725}{t} + 3t(\frac{0,029725}{t})^2 + (\frac{0,029725}{t})^3 - 0,0892t \\ - 0,0892 \frac{0,029725}{t} + 0,0122 = 0$$

$$t^3 + 0,0892t + \frac{0,00265}{t} + \frac{0,000026}{t^3} - 0,0892t - \frac{0,00265}{t} + 0,0122 = 0$$

$$t^3 + \frac{0,000026}{t^3} + 0,0122 = 0$$

Помножуємо отримане рівняння на t^3 :

$$t^6 + 0,0122t^3 + 0,000026 = 0$$

Робимо заміну змінної $v=t^3$

$$v^2 + 0,0122v + 0,000026 = 0$$

$$D = b^2 - 4ac = 0,0122^2 - 4 * 0,000026 = 0,000093$$

$$v_{1,2} = \frac{-0,0122 \pm \sqrt{0,000093}}{2} = \begin{cases} -0,00281 \\ -0,00936 \end{cases}$$

На цьому етапі можна обрати будь-яке з рішень – це не вплине на подальший розв'язок рівняння. Обираємо v_1 .

$$t = \sqrt[3]{-0,00281}$$

$$t_1 = -0,141$$

$$t_2 = 0,0705 + i * 0,1222$$

$$t_3 = 0,0705 - i * 0,1222$$

Тоді u :

$$u_1 = -0,3518$$

$$u_2 = 0,1759 + i * 0,0604$$

$$u_3 = 0,1759 - i * 0,0604$$

Та корені характеристичного рівняння:

$$z_1 = 0,4432$$

$$z_2 = 0,9709 + i * 0,0604$$

$$z_3 = 0,9709 - i * 0,0604$$

Тепер перевіряємо, чи усі корені за модулем менші за 1. Перший одразу очевидно, що так.

Модуль комплексного числа – відстань від його положення до центру координат комплексної площини:

$$|(a + i * b)| = \sqrt{a^2 + b^2} \quad (4.4)$$

$$|z_2| = |z_3| = \sqrt{0,9709^2 + 0,0604^2} = 0,9728$$

Отже, оскільки усі корені характеристичного рівняння менше одиниці за модулем, система стійка за загальним критерієм.

Тепер перевіримо стійкість системи за білінійним критерієм.

Коли мова йде про неперервну передавальну функцію системи відносно змінної S , область її стійкості знаходиться у лівій півплощині комплексної площини. Після Z -перетворення область стійкості переходить в одиничне коло з центром у початку координат. Це ускладнює аналіз.

Для спрощення аналізу у частотній області використовують псевдочастоту. А щоб до неї перейти, виконують заміну змінної у характеристичному рівнянні замкненої цифрової передавальної функції:

$$D(z) = z^3 - 2,385z^2 + 1,8069z - 0,41943$$

$$z = \frac{1 + w}{1 - w} \quad (4.5)$$

					ІА62.180БАК.005 ПЗ	Лист
						39
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		

$$D(z) = \left(\frac{1+w}{1-w}\right)^3 - 2,385 \left(\frac{1+w}{1-w}\right)^2 + 1,8069 \left(\frac{1+w}{1-w}\right) - 0,41943 =$$

Помножимо на (1-W):

$$\begin{aligned} & (1+w)^3 - 2,385(1+w)^2(1-w) + 1,8069(1+w)(1-w)^2 - 0,41943(1-w)^3 = \\ & = 1 + 3w + 3w^2 + w^3 - 2,385(1 + 2w + w^2)(1-w) + \\ & + 1,8069(1+w)(1-2w+w^2) - 0,41943(1-3w+3w^2-w^3) = \\ & = 1 + 3w + 3w^2 + w^3 - 2,385 - 4,77w - 2,385w^2 + 2,385w + \\ & 4,77w^2 + 2,385w^3 + 1,8069 - 3,6138w + 1,8069w^2 + 1,8069w - \\ & 3,6138w^2 + 1,8069w^3 - 0,41943 + 1,25829w - 1,25829w^2 + 0,41943w^3 = \\ & 5,61133w^3 + 2,31981w^2 + 0,006639w + 0,00247 = 0 \end{aligned}$$

Тепер для зміненого характеристичного рівняння можна застосовувати критерії як до неперервних функцій. Застосовуємо критерій Гурвіца [12,13].

За критерієм Гурвіца, для того щоб система була стійка, потрібно щоб усі коефіцієнти її характеристичного рівняння були додатні, та усі визначники були додатні.

Очевидно, усі коефіцієнти додатні, а визначник:

$$a_1 * a_2 + a_0 * a_3 = 2,31981 * 0,006639 - 0,00247 * 5,61133 = 0,14015$$

Визначник більше нуля, отже за критерієм Гурвіца, система стійка.

					ІА62.180БАК.005 ПЗ	Лист
						40
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		

4.2 Частотні характеристики цифрової системи

Амплітудно-фазова частотна характеристика (АФЧХ) - представлення частотного відгуку лінійної стаціонарної динамічної системи у вигляді графіка в комплексній площині. На такому графіку частота виступає в якості параметра кривої, фаза і амплітуда системи на заданій частоті представляється кутом і довжиною радіус-вектора кожної точки характеристики. По суті такий графік об'єднує на одній площині амплітудно-частотну і фазо-частотну характеристики.

АФЧХ застосовується в основному для аналізу систем, зокрема дослідження системи на стійкість і її запасів.

АФЧХ є класичним засобом аналізу стійкості лінійних систем. Існує безліч програмних продуктів, що дозволяють проводити дослідження на стійкість частотними методами.

Для побудови АФЧХ скористаємося командним рядком програмного пакету Matlab (рисунок 4.1 - 4.2) [12,13]:

```
>> w=tf([0.0063 -0.00013 -0.00373],[1 -2.3913 1.807 -0.4157],0.1)

w =

      0.0063 z^2 - 0.00013 z - 0.00373
-----
      z^3 - 2.391 z^2 + 1.807 z - 0.4157

Sample time: 0.1 seconds
Discrete-time transfer function.

>> nyquist(w)
```

Рисунок 4.1 – Побудова АФЧХ

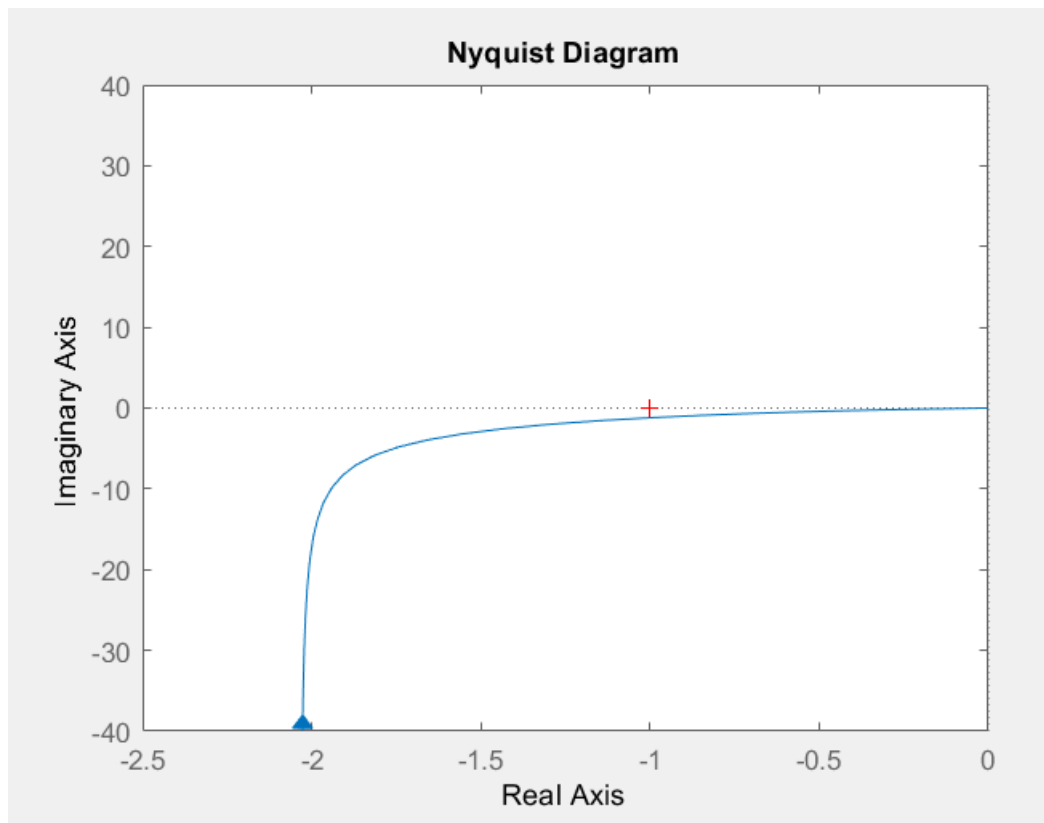


Рисунок 4.2 – АФЧХ цифрової системи самонаведення ракети

Існує критерій стійкості Найквіста. За цим критерієм, для того, щоб система була стійка, треба, щоб АФЧХ її розімкненої передавальної функції не охоплювало точку $(-1;0)$. Як бачимо з графіка, АФЧХ проходить нижче, отже система стійка за критерієм Найквіста.

Для побудови ЛАФЧХ застосуємо також програмний пакет Matlab (рисунок 4.3):

```
>> bode(w)
```

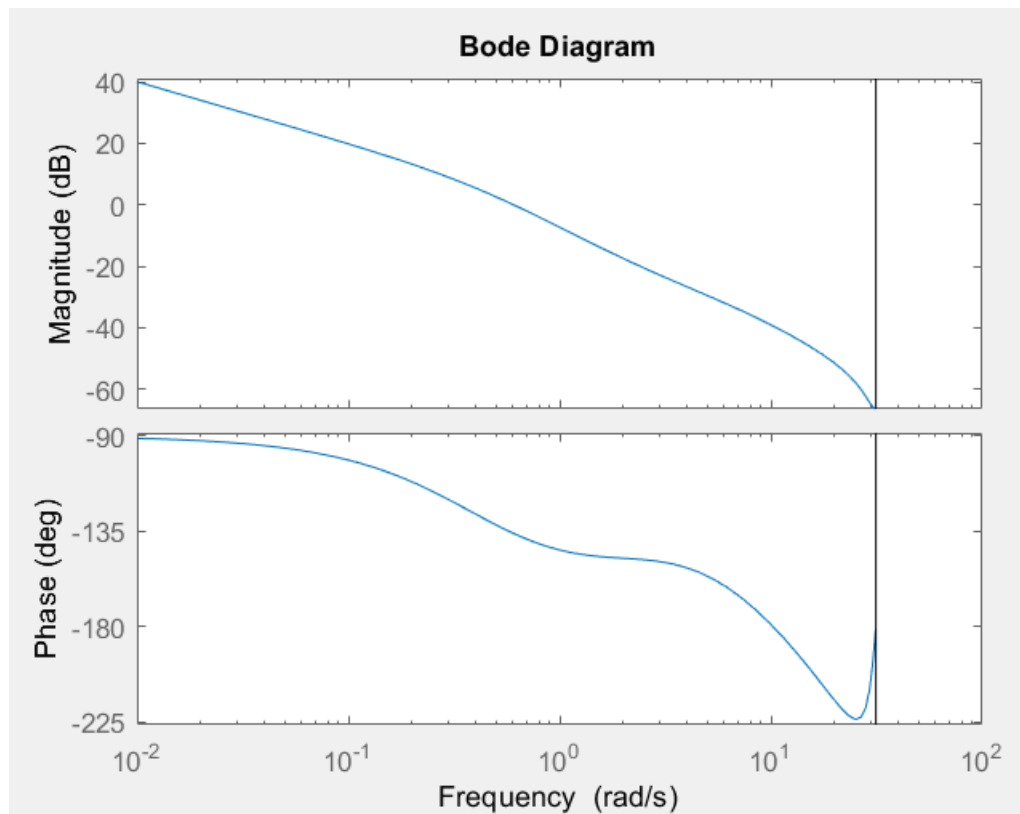


Рисунок 4.3 – ЛАФЧХ цифрової системи самонаведення ракети

Для цифрових систем введено поняття частоти Найквіста, що визначає границю роздільної здатності системи по обробці даних. Вона визначається за формулою:

$$\omega = \frac{\pi}{T_0} \quad (4.6)$$

На графіку вона позначена вертикальною чорною лінією. Побудова частотних характеристик за межею цієї частоти не виконується, оскільки вони не будуть відповідати дійсності.

4.3 Якість цифрової системи

Так само, як під час аналізу безперервних систем, поведінка в часі цифрової системи управління може бути охарактеризована такими показниками як: перерегулювання, час встановлення, час регулювання та помилка [12,13].

					IA62.180БАК.005 ПЗ	Лист
						43
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		

Значення показників якості цифрових систем залежить від обраного періоду квантування і його збільшення може призвести до її нестійкості. Він повинен бути обраний менше за мінімальну постійну часу передавальної функції.

Перерегулювання – показує на скільки відсотків амплітуда перехідного процесу перевищила стале кінцеве значення.

$$h = \frac{h_{\max} - h_{\text{ст}}}{h_{\text{ст}}} \quad (4.7)$$

Час встановлення – час від початку перехідного процесу до того, як графік вперше досягне рівня сталого кінцевого значення.

Час регулювання – час, за який система встановлюється у 5% коридорі значень відносно кінцевого сталого значення і більше не покидає його.

Модель цифрової системи представлена на рисунку 4.4.

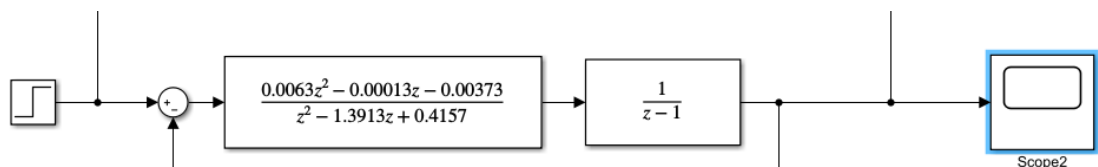


Рисунок 4.4 – Модель цифрової системи

Показники якості перехідного процесу наведено на рисунку 4.5.

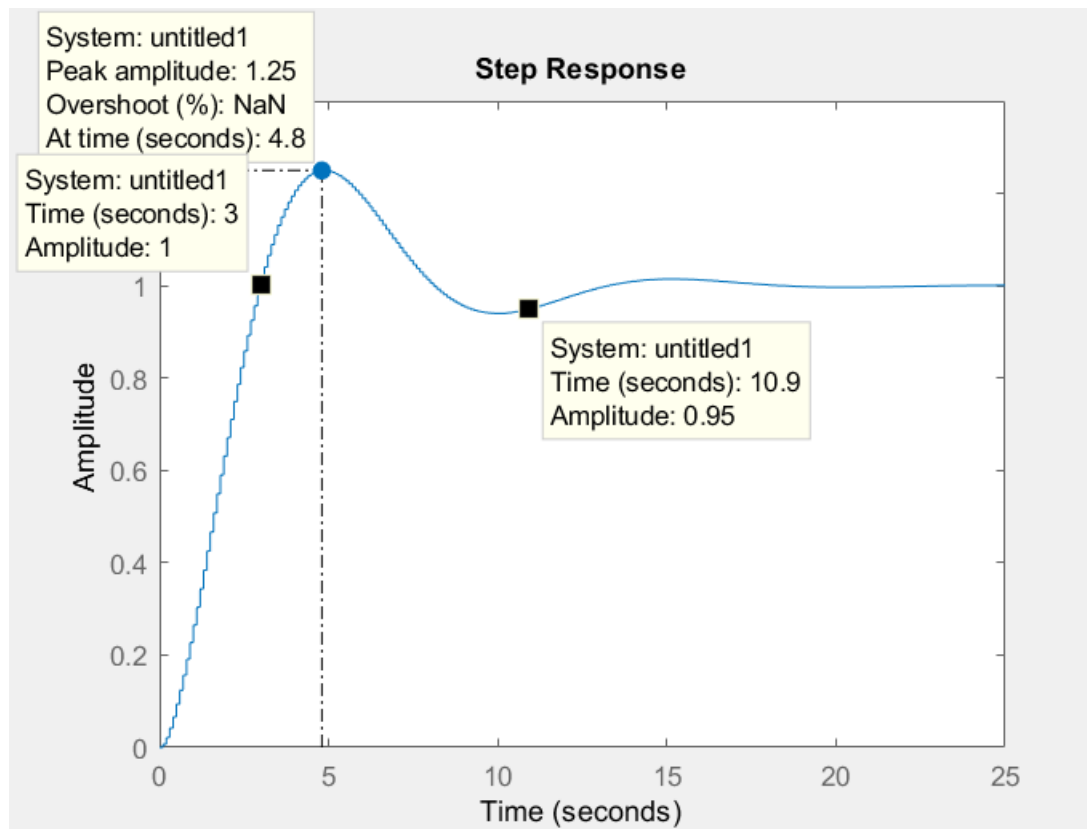


Рисунок 4.5 – Показники якості перехідного процесу

Отже система має наступні показники якості:

- Час встановлення 3с;
- Час перехідного процесу 10.9с;
- Перерегулювання $h = \frac{1,25-1}{1} * 100\% = 25\%$.

Для обрахування помилки скористаємося формулою:

$$E = \frac{z}{z-1} * (1 - W_3) \quad (4.8)$$

Передавальну функцію замкненої системи візьмемо з підрозділу про стійкість системи:

$$E = \frac{z}{z-1} * \left(1 - \frac{0,0063z^2 - 0,00013z - 0,00373}{z^3 - 2,385z^2 + 1,8069z - 0,4194} \right) =$$

$$= \frac{z}{z-1} * \left(\frac{z^3 - 2,3913z^2 + 1,8072z - 0,4159}{z^3 - 2,385z^2 + 1,8069z - 0,4194} \right)$$

$$E_{\text{ст}} = \lim_{z \rightarrow 1} (z-1) * E$$

$$E_{\text{ст}} = \lim_{z \rightarrow 1} (z-1) * \frac{z}{z-1} * \left(\frac{z^3 - 2,3913z^2 + 1,8072z - 0,4159}{z^3 - 2,385z^2 + 1,8069z - 0,4194} \right) =$$

$$= \lim_{z \rightarrow 1} \frac{z^4 - 2,3913z^3 + 1,8072z^2 - 0,4159z}{z^3 - 2,385z^2 + 1,8069z - 0,4194} = \frac{0}{0,0025} = 0$$

Перевіримо отримане значення помилки системи у середовищі Matlab Simulink (рисунок 4.6):

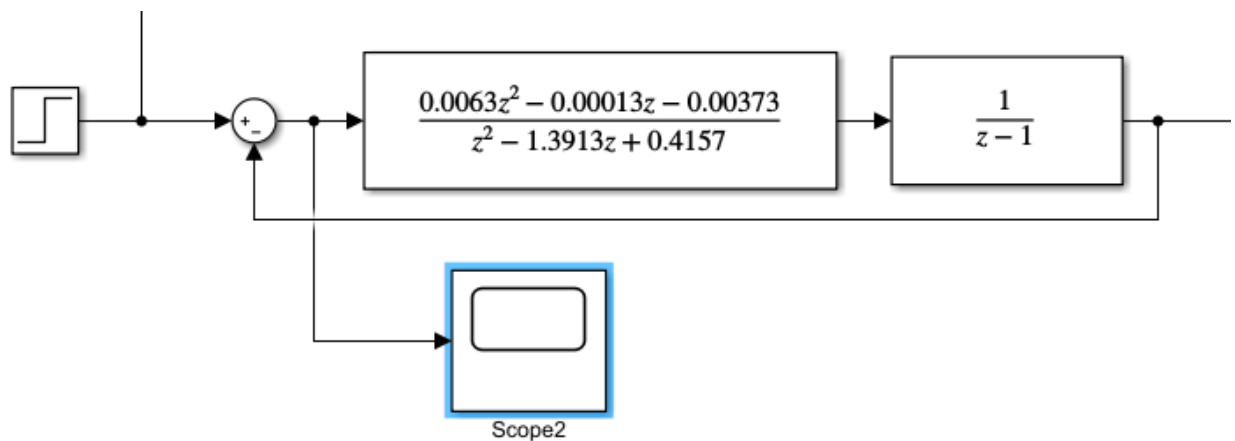


Рисунок 4.6 – Модель цифрової системи для визначення помилки

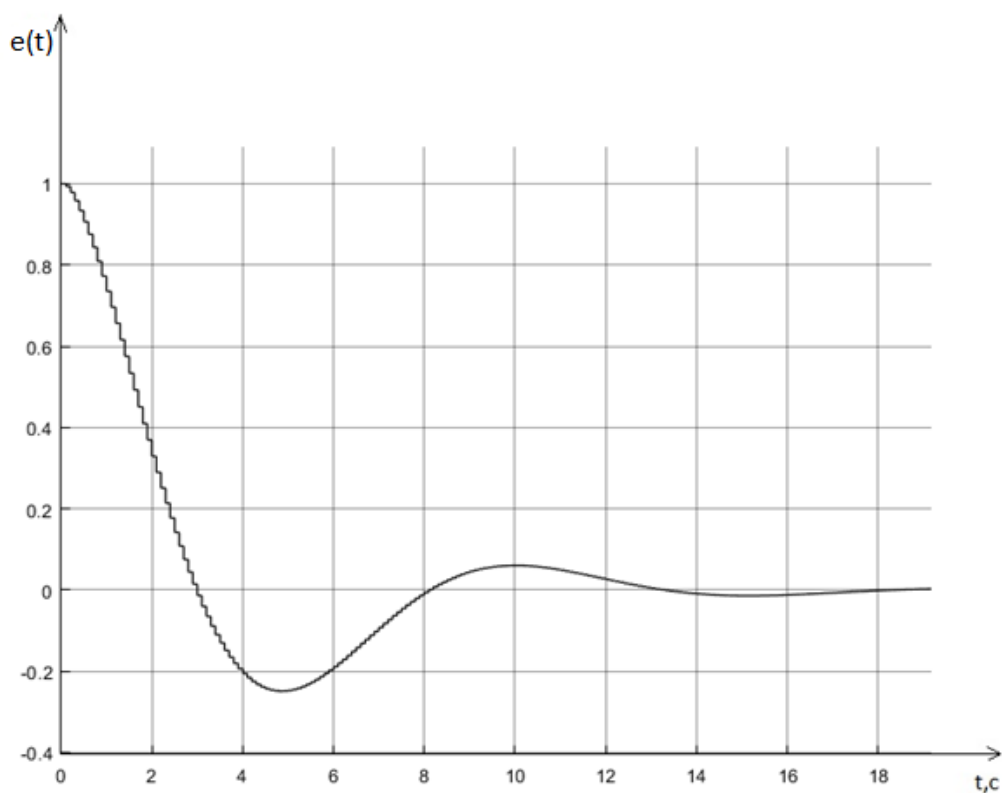


Рисунок 4.7 – Графік зміни помилки з часом

Як бачимо, сталі значення помилки системи дорівнює нулю.

4.4 Висновок четвертого розділу

Система стійка, але має наступні показники якості:

- Час встановлення 3с;
- Час перехідного процесу 10.9с;
- Перерегулювання 25%;
- Похибка 0%.

Вони не відповідають вимогам до системи самонаведення ракети: перерегулювання має бути менше 10%; час перехідного процесу має бути менше 2с. Отже виникає потреба в синтезі цифрового регулятора.

5 СИНТЕЗ ЦИФРОВОГО РЕГУЛЯТОРА ДЛЯ СИСТЕМИ НАВЕДЕННЯ ПРОТИТАНКОВОЇ РАКЕТИ

5.1 Синтез цифрового регулятора методом вибору бажаних передавальних функцій

Нехай бажана функція має вигляд [12,13]:

$$W_6(z) = \frac{W_p(z)}{1 + W_p(z)} = \frac{D(z) * W(z)}{1 + D(z) * W(z)} \quad (5.1)$$

Де $W_6(z)$ – бажана передавальна функція замкнутої системи, $W_p(z)$ – передавальна функція розімкнутої системи, $W(z)$ – передавальна функція цифрової системи самонаведення без регулювання, $D(z)$ – передавальна функція цифрового регулятора.

Спочатку треба виконати факторизацію. Оскільки необхідно забезпечити бажаний процес у замкнутій системі і забезпечити астатизм r за заданим впливом, то факторизація має вигляд:

$$W(z) = \frac{B(z)}{(z - 1)^{r_0} * C^+(z) * C^-(z)} \quad (5.2)$$

$$W(z) = \frac{0,0063z^2 - 0,00013z - 0,00373}{(z - 1)(z^2 - 1,3913z + 0,4157)}$$

$$D = 1,3913^2 - 4 * 0,4157 = 0,2729$$

$$z_{1,2} = \frac{1,3913 \pm \sqrt{0,2729}}{2} = \begin{cases} 0,9569 \\ 0,4345 \end{cases}$$

$$W(z) = \frac{0,0063z^2 - 0,00013z - 0,00373}{(z - 1)(z - 0,9569)(z - 0,4345)}$$

Де $B(z)$ – поліном чисельника передавальної функції. $C^+(z)$ – поліном знаменника ступеня $\|C^+(z)\|$, корені якого лежать у колі одиничного радіуса. $C^-(z)$ – поліном знаменника ступеня $\|C^-(z)\|$, корені якого лежать поза колом одиничного радіуса. Початковий астатизм r_0 дорівнює 1, а кінцевий r залишається теж 1. Обидва корені лежать в колі одиничного радіуса.

$$B(z) = 0,0063z^2 - 0,00013z - 0,00373$$

$$C^+(z) = (z - 0,9569)(z - 0,4345)$$

$$C^-(z) = 1$$

Визначено бажаний поліном характеристичного рівняння:

$$Q(z) = (z - 0,5)^3 = z^3 - 1,5z^2 + 0,75z - 0,125$$

Далі обрано поліноми N та M , такі, щоб їх ступені задовольняли умовам:

$$\|N\| \geq \|B\| \quad (5.3)$$

$$\|N\| = 2$$

$$N(z) = n_2z^2 + n_1z + n_0$$

$$\|M\| \geq \|C^-\| + r - 1 \quad (5.4)$$

$$\|M\| = 0 + 1 - 1 = 0$$

$$M(z) = m_0$$

Тепер обраховуємо коефіцієнти за формулою:

$$B(z) * M(z) + (z - 1)^r * C^-(z) * N(z) = Q(z) \quad (5.5)$$

$$(0,0063z^2 - 0,00013z - 0,00373) * m_0 + (z - 1)^1 * 1 * (n_2z^2 + n_1z + n_0) = Q(z)$$

$$0,0063z^2m_0 - 0,00013zm_0 - 0,00373m_0 + n_2z^3 + n_1z^2 + n_0z - n_2z^2 - n_1z - n_0 = z^3 - 1,5z^2 + 0,75z - 0,125$$

Виділяємо множники при однакових степенях z та прирівнюємо коефіцієнти до $Q(z)$:

$$n_2z^3 + (0,0063m_0 + n_1 - n_2)z^2 + (n_0 - 0,00013m_0 - n_1)z - (0,00373m_0 + n_0) = z^3 - 1,5z^2 + 0,75z - 0,125$$

$$n_2 = 1$$

$$\begin{cases} 0,0063m_0 + n_1 - n_2 = -1,5 \\ n_0 - 0,00013m_0 - n_1 = 0,75 \\ 0,00373m_0 + n_0 = -0,125 \end{cases}$$

$$\begin{cases} n_1 = -0,5 - 0,0063m_0 \\ 0,125 - 0,00373m_0 - 0,00013m_0 + 0,5 + 0,0063m_0 = 0,75 \\ n_0 = -0,125 - 0,00373m_0 \end{cases}$$

$$m_0 = \frac{0,75 - 0,5 - 0,125}{0,0063 - 0,00013 - 0,00373} = \frac{0,125}{0,00244} = 51,2295$$

$$n_1 = -0,8227$$

$$n_0 = -0,0661$$

$$M(z) = 51,2295$$

$$N(z) = z^2 - 0,8227z - 0,0661$$

Тоді передавальна функція цифрового регулятора за бажаними функціями буде мати вигляд:

$$D(z) = \frac{(z-1)^{r_0-r} * C^+(z) * M(z)}{N(z)} \quad (5.6)$$

$$D(z) = \frac{(z-1)^0 * (z^2 - 1,3913z + 0,4157) * 51,2295}{z^2 - 0,8227z - 0,0661}$$

$$= \frac{51,2295z^2 - 71,2756z + 21,2961}{z^2 - 0,8227z - 0,0661}$$

Перевіримо ефективність регулятора змодельюючи процес в програмному середовищі Matlab Simulink (рисунок 5.1 – 5.2):

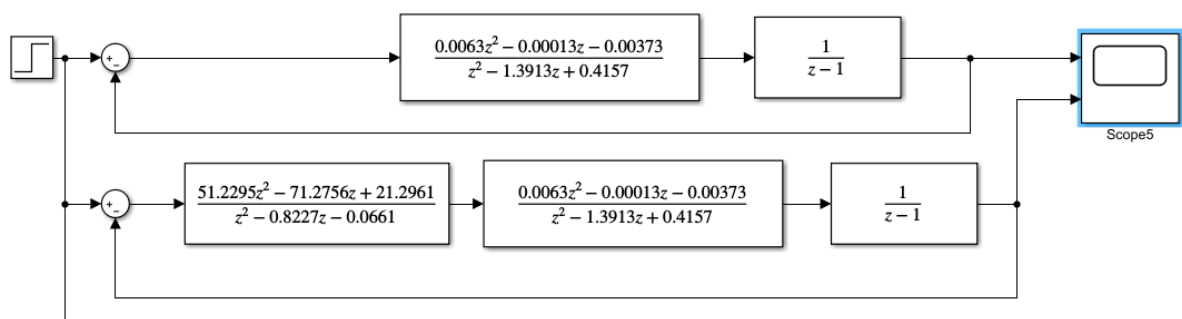


Рисунок 5.1 – Порівняння моделей цифрових систем самонаведення без регулювання та з регулятором за бажаними функціями

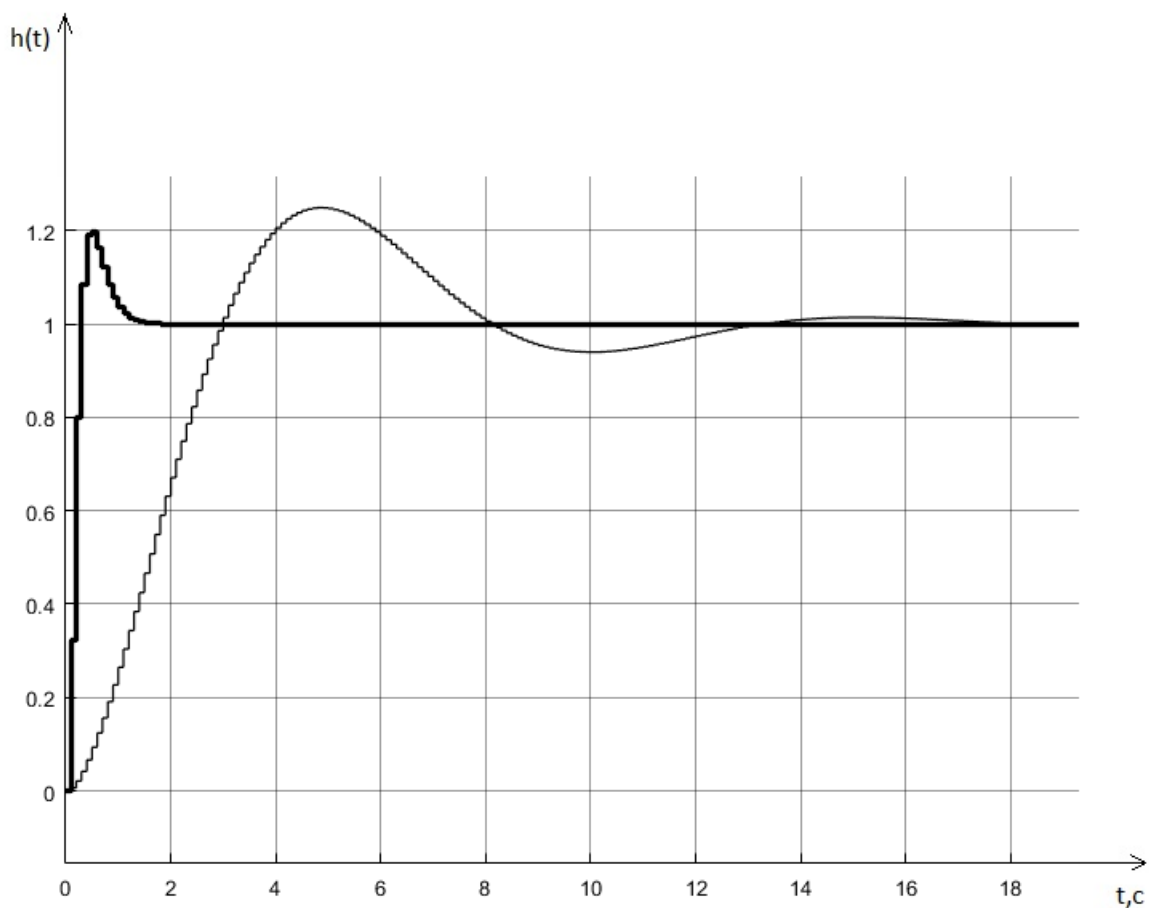


Рисунок 5.2 – Порівняння перехідних процесів системи без регулятора та з регулятором за бажаними функціями

Показники якості процесу з регулюванням:

- перерегулювання 20%;
- час встановлення 0.5с;
- час перехідного процесу 1.4с;
- помилка 0%.

Перехідний процес вийшло значно покращити, але є потреба розрахувати ще один регулятор та обрати кращий.

Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата

IA62.180БАК.005 ПЗ

Лист

52

5.2 Синтез цифрового ПД регулятора

ПД-регулятор – регулятор, який складається з трьох складових: пропорційної, інтегруючої та диференціальної. Використовується в системах зі зворотним зв'язком, на вхід подається похибка системи та, після проходження через усі складові паралельно, складається у керуючий вплив.

ПД-регулятор синтезуємо методом компенсації його нулями полюсів передавальної функції системи. Нулі функції - корені чисельника. Полюси функції – корені знаменника.

Тому ПД-регулятор найкраще підходить для систем, які мають два полюси, оскільки порядок його чисельника другий.

Але, в цільовій системі вже присутній астатизм, тобто присутня інтегральна складова, ПД-регулятор не підходить, оскільки підвищення порядку астатизму до другого, за критерієм Гурвіца, призведе до нестійкої системи.

Тому розраховано ПД-регулятор. Він компенсує лише один полюс. Отже проведено дослідження: компенсуємо окремо перший та другий полюси, а потім оберемо який з перехідних процесів кращий. Передавальна функція ПД-регулятора обраховується наступним чином [12,13]:

$$W_{\text{ПД}} = K_p + \frac{K_d * (z - 1)}{T * z} = \frac{K_d z - K_d + K_p T z}{T * z} = \frac{(z - \frac{K_d}{K_p T + K_d})}{T * z} \quad (5.7)$$

$$\left(z - \frac{K_d}{K_p T + K_d} \right) = (z - C) , \quad (5.8)$$

де $W_{\text{ПД}}$ – передавальна функція ПД-регулятора;

K_p – пропорційний коефіцієнт;

K_d – диференціальний коефіцієнт;

T - час квантування;

C – полюс цільової функції.

Передавальна функція цифрової системи має вигляд:

$$W(z) = \frac{0,0063z^2 - 0,00013z - 0,00373}{(z - 1)(z - 0,9569)(z - 0,4345)}$$

$$C_1 = 0,4345$$

$$C_2 = 0,9569$$

Спочатку розрахуємо граничний коефіцієнт підсилення системи з характеристичного рівняння для критерію Гурвіца:

$$5,61133w^3 + 2,31981w^2 + 0,006639w + 0,00247 + K = 0$$

$$a_1 * a_2 + a_0 * (a_3 + K) = 0$$

$$0,15401 - 0,01386 - 5,61133 * K = 0$$

$$K = \frac{0,15401 - 0,01386}{5,61133} = 0,02497$$

Оскільки граничний коефіцієнт підсилення стосується усієї системи, то, для отримання пропорційного коефіцієнту регулятора, потрібно поділити його на коефіцієнт підсилення цільової функції:

$$K_p = \frac{0,02497}{0,0063} = 3,96349$$

Компенсуємо перший полюс цільової функції:

					ІА62.180БАК.005 ПЗ	Лист
						54
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		

$$\frac{K_d}{K_p T + K_d} = 0,4345$$

$$K_d = C * K_p T + C * K_d$$

$$K_d * (1 - C) = C * K_p T$$

$$K_d = \frac{C * K_p T}{(1 - C)} = \frac{0,4345 * 0,1 * 3,96349}{1 - 0,4345} = 0,30453$$

Моделюємо отриманий регулятор в програмному пакеті Matlab Simulink (рисунок 5.3 - 5.4):

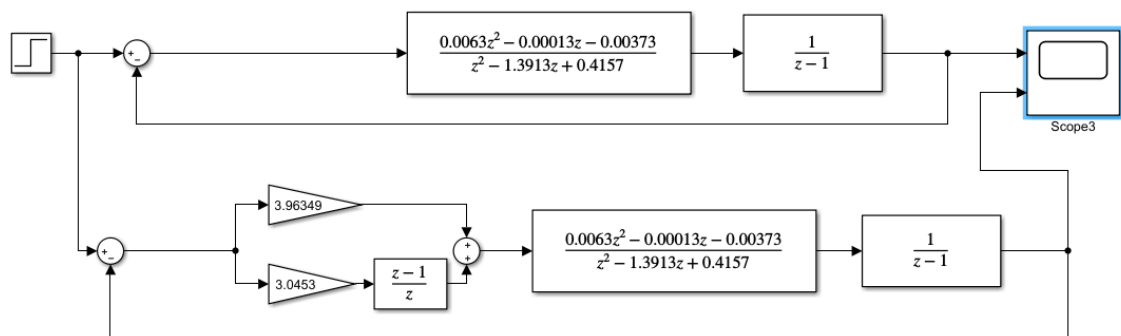


Рисунок 5.3 – Модель порівняння цифрової системи без регулювання та з ПД-регулятором для першого полюса

Як видно з графіку перехідних процесів, регулятор не дуже покращив систему, отже можна зробити висновок, що на її якість більше впливає другий полюс.

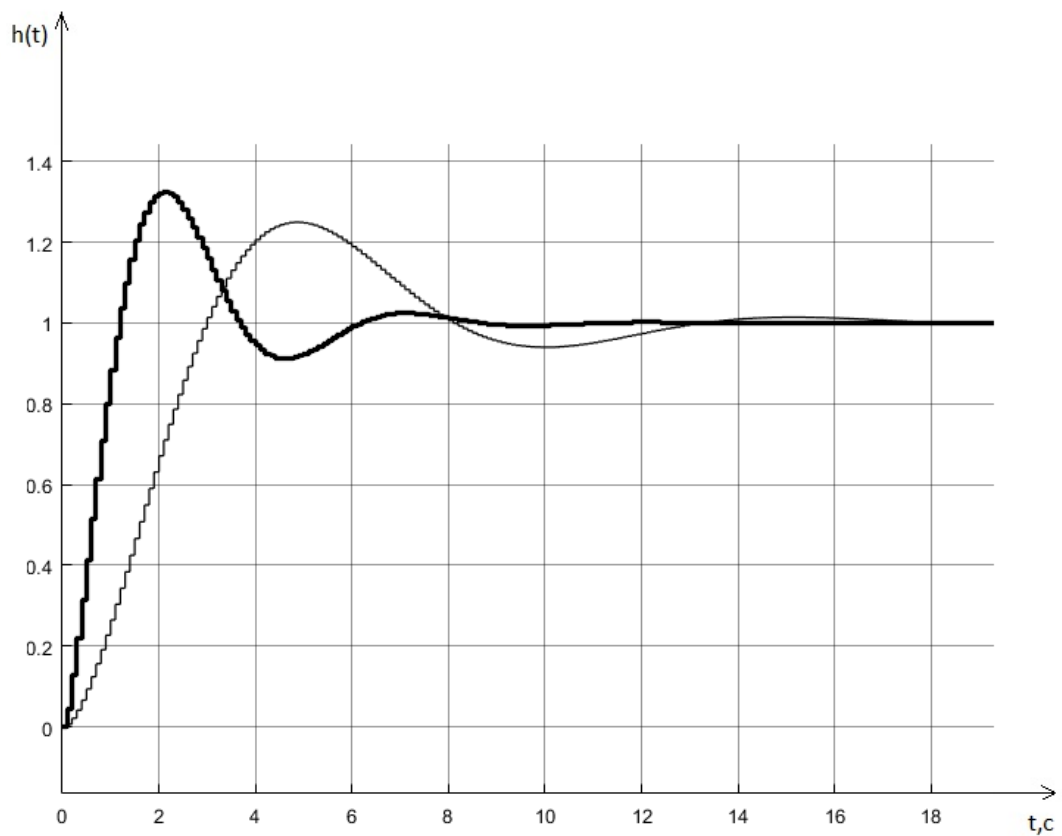


Рисунок 5.4 - Порівняння перехідних процесів системи без регулятора та з ПД-регулятором для першого полюса

Як видно з графіку перехідних процесів, регулятор не дуже покращив систему, отже можна зробити висновок, що на її якість більше впливає другий полюс.

Тепер компенсуємо другий полюс цільової функції:

$$\frac{K_d}{K_p T + K_d} = 0,9569$$

$$K_d = \frac{C * K_p T}{(1 - C)} = \frac{0,9569 * 0,1 * 3,96349}{1 - 0,9569} = 8,79968$$

Тепер порівняємо отримані ПД-регулятори (рисунок 5.5 – 5.6):

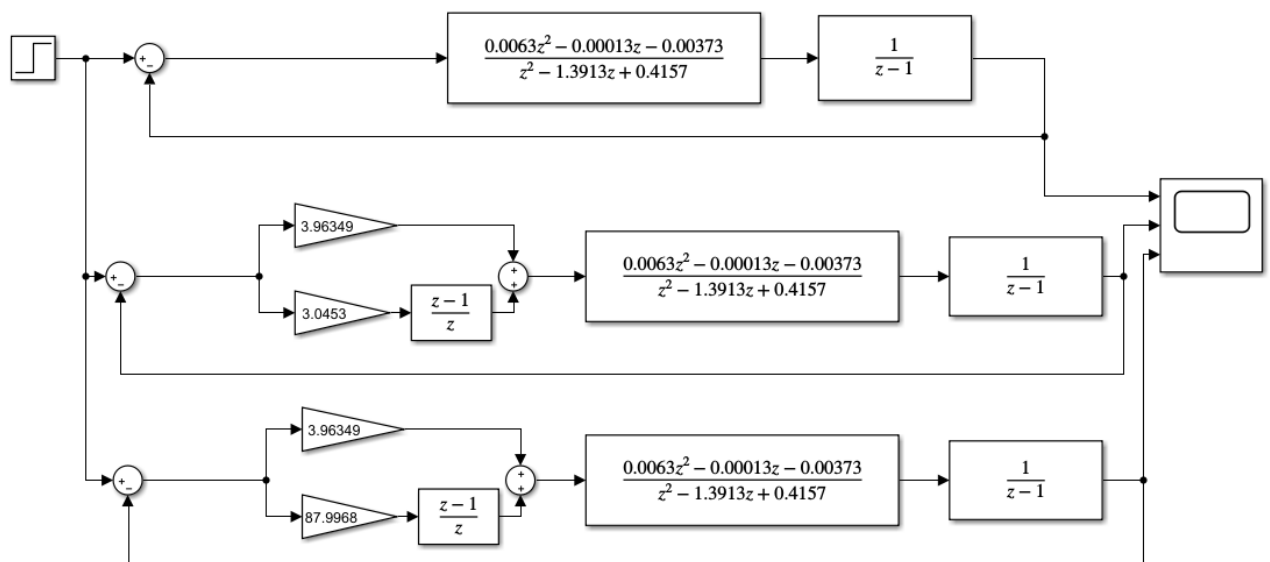


Рисунок 5.5 – Порівняння моделей отриманих ПД-регуляторів

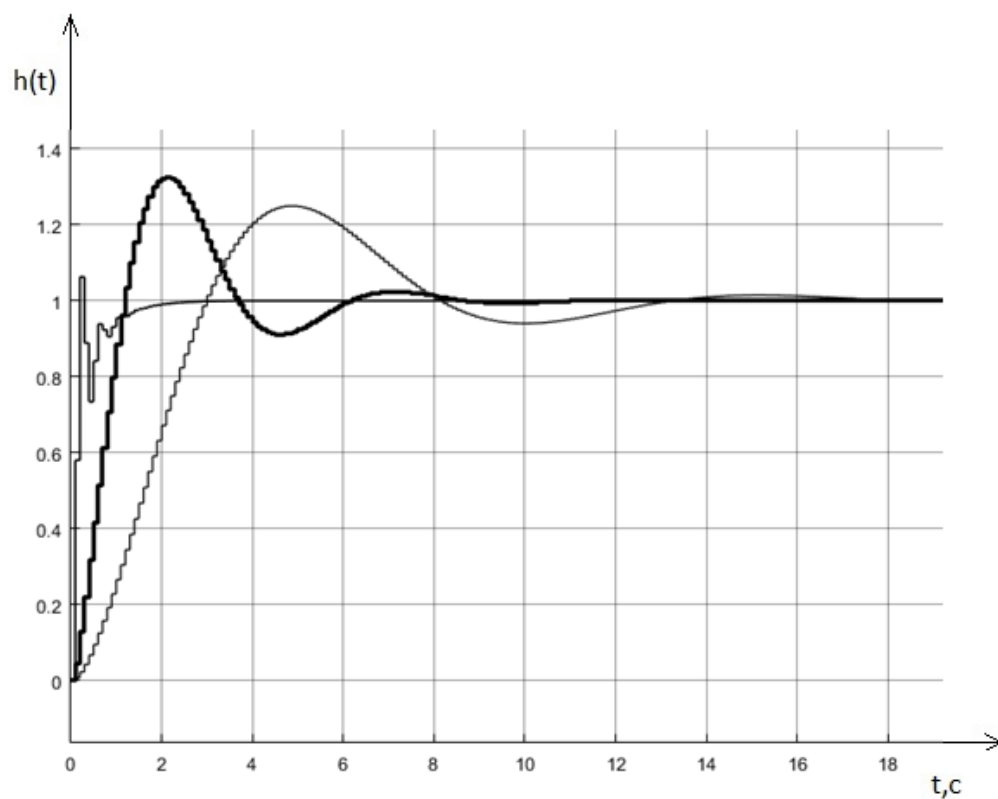


Рисунок 5.6 – Порівняння графіків перехідних процесів ПД-регуляторів

Очевидно, другий ПД-регулятор значно покращив перехідний процес і тепер він відповідає потрібним показникам якості.

В результаті дослідження робимо висновок: ПД-регулятором треба компенсувати той полюс цільової функції, який за модулем більший.

5.3 Висновок п'ятого розділу

Порівняємо два отримані регулятори разом, та оберемо кращий за показниками якості:

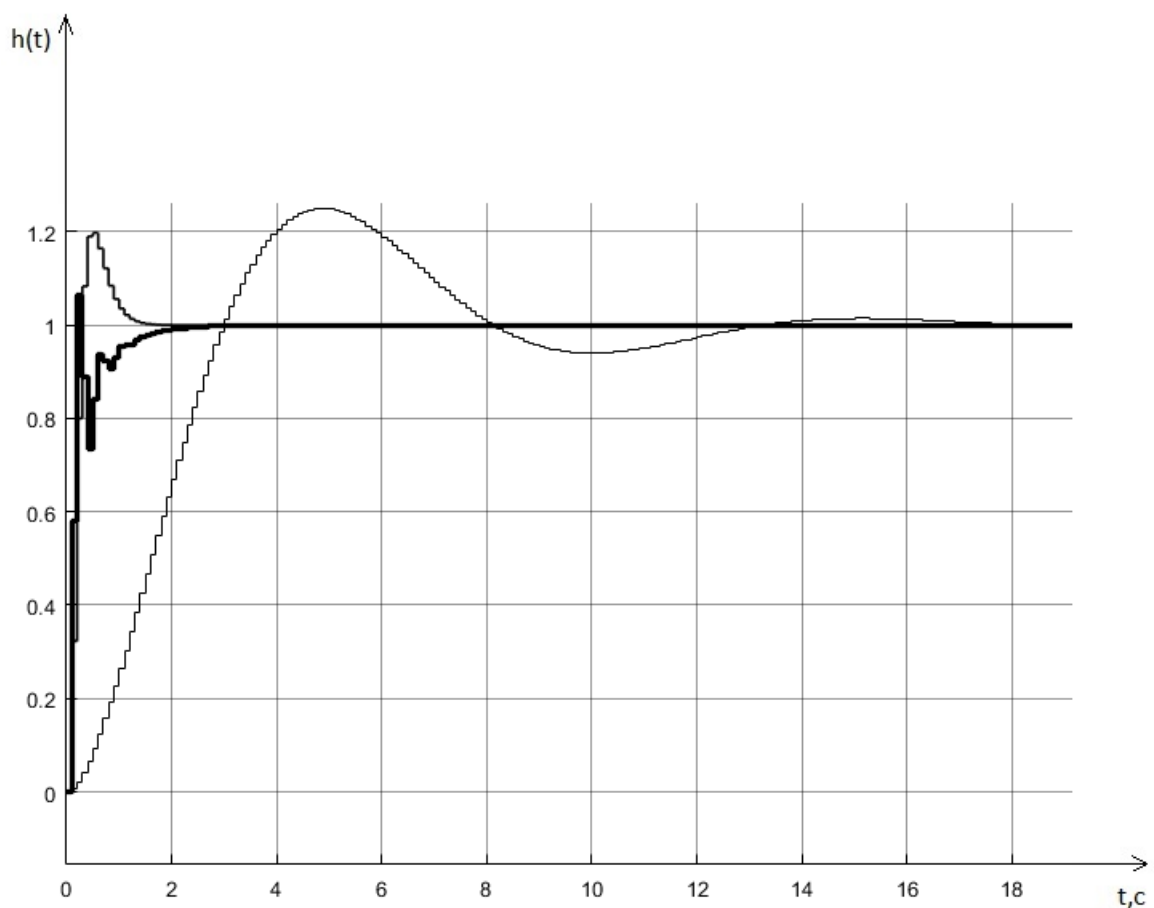


Рисунок 5.7 – Порівняння графіків перехідних процесів системи без регулювання та з регуляторами

Як видно з графіків перехідний процесів, ПД-регулятор має час становлення менший ніж регулятор за бажаними функціями: 0,3с проти 0,4с; час перехідного процесу: в обох 1,1с; перерегулювання: 6% проти 20%. Помилка 0%.

Отже обираємо ПД-регулятор. Отримані наступні показники якості системи самонаведення протитанкової ракети з регулятором:

- помилка 0%;
- час встановлення 0,3с;
- час перехідного процесу 1,1с;
- перерегулювання 6%.

Ці показники якості відповідають поставленому завданню. Отже система з розробленим регулятором повністю забезпечує швидкість і точність наведення ракети та високу вірогідність влучання в ціль.

Мінімальна відстань пострілу з розрахунком на швидкість ракети 218 метрів за секунду та часі перехідного процесу 1,1 секунди виходить 240 метрів. Але це не суттєва проблема через те, що такі комплекси частіше за все використовують для знищення цілей на відстані в декілька кілометрів.

					ІА62.180БАК.005 ПЗ	Лист
						59
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		

6 ПРОГРАМНА РЕАЛІЗАЦІЯ РЕГУЛЯТОРА

6.1 Метод безпосередньої декомпозиції

У загальному вигляді, передавальна функція цифрового регулятора має вигляд [12,13]:

$$D(z) = \frac{b_0 + b_1 z^{-1} + b_2 z^{-2} + \dots + b_m z^{-m}}{a_0 + a_1 z^{-1} + a_2 z^{-2} + \dots + a_n z^{-n}} = \frac{E_2(z)}{E_1(z)} \quad (6.1)$$

Представимо цю функцію наступним чином:

$$E_2(z) = (b_0 + b_1 z^{-1} + \dots + b_m z^{-m}) * A(z) \quad (6.2)$$

$$A(z) = \frac{1}{a_0} * E_1 - \frac{1}{a_0} * (a_0 + a_1 z^{-1} + \dots + a_n z^{-n}) * A(z) \quad (6.3)$$

Де $A(z)$ – фіктивна змінна. z^{-1} – це затримка на один такт. Для її реалізації потрібна операція накопичення даних – вона виконується ланкою затримки.

Маємо передавальну функцію цифрового ПД- регулятора:

$$\begin{aligned} W_{\text{ПД}} &= 3,96349 + \frac{87,9968 * (z - 1)}{z} = \frac{3,96349z + 87,9968z - 87,9968}{z} = \\ &= \frac{91,96029z - 87,9968}{z} = \frac{91,96029 - 87,9968z^{-1}}{1} = \frac{E_2(z)}{E_1(z)} \end{aligned}$$

$$E_2(z) = (91,96029 - 87,9968z^{-1}) * A(z)$$

$$A(z) = \frac{1}{1} * E_1(z) - \frac{1}{1} * 1 * A(z)$$

Тепер реалізуємо методом безпосередньої декомпозиції у програмному середовищі Matlab Simulink та порівняємо з оригіналом (рисунок 6.1 – 6.2):

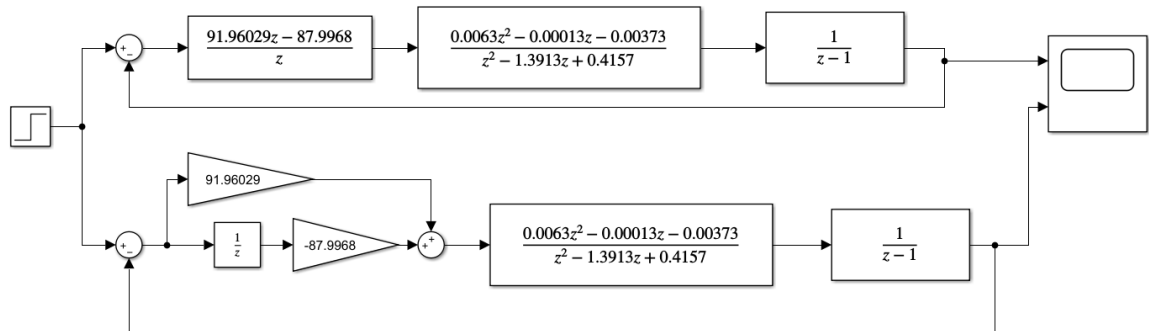


Рисунок 6.1 – Реалізація ПД-регулятора методом безпосередньої декомпозиції

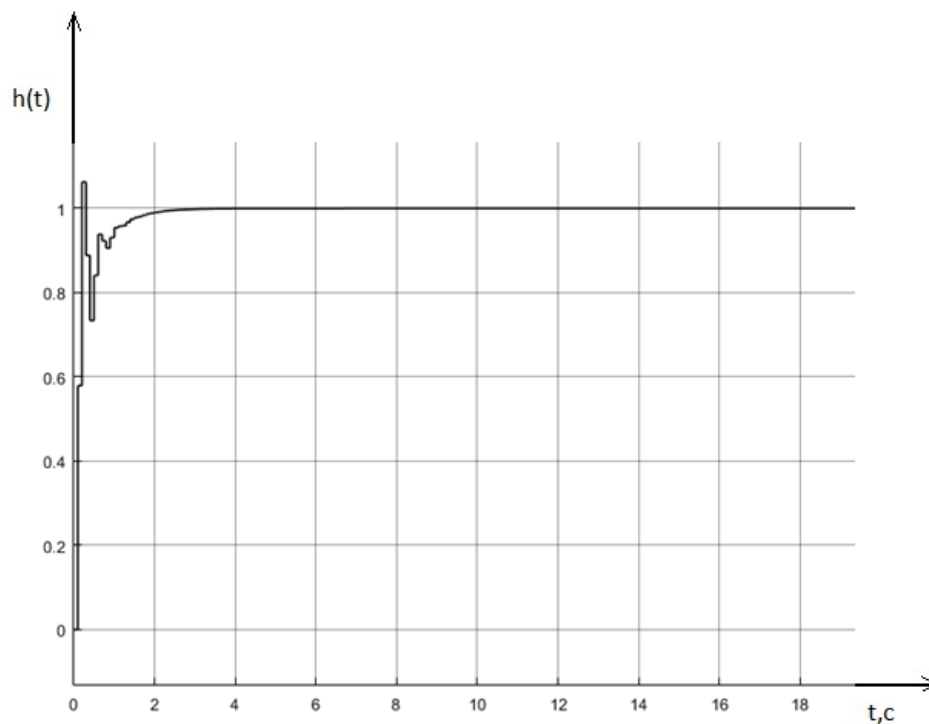


Рисунок 6.2 – Порівняння графіків перехідних процесів оригіналу та реалізованого регулятора

Як бачимо з рисунку 6.2, моделі повністю співпали, отже регулятор реалізовано правильно.

6.2 Реалізація регулятора мовою програмування ST

Для реалізації системи у програмному середовищі CodeSys потрібно представити усі її передавальні функції наступним чином [14]:

$$W_{\text{ПД}} = \frac{91,96029 - 87,9968z^{-1}}{1} = \frac{y_r}{x_r}$$

$$y_r = 91,96029x_r - 87,9968x_r * z^{-1}$$

$$W(z) = \frac{0,0063 - 0,00013z^{-1} - 0,00373z^{-2}}{1 - 1,3913z^{-1} + 0,4157z^{-2}} = \frac{y_m}{x_m}$$

$$y_m = 1,3913y_m * z^{-1} - 0,4157y_m * z^{-2} + 0,0063x_m - 0,00013x_m * z^{-1} - 0,00373x_m * z^{-2}$$

$$W_i(z) = \frac{1}{1 - z^{-1}} = \frac{y_i}{x_i}$$

$$y_i = y_i * z^{-1} + x_i$$

Де z^{-1} – це затримка на один такт. Для її реалізації потрібна пам'ять програми – накопичення даних. Для цього створено масиви даних для кожної з функцій, які зберігають інформацію про значення за певну кількість останніх тактів.

В такому вигляді можна програмувати передавальні функції регулятора, цільової функції та інтегратора.

ST (Structured Text) - це текстова мова програмування високого рівня загального призначення, по синтаксису схожий з мовою Pascal. Зручний для програм, що включають числовий аналіз або складні алгоритми [15].

Відповідно до стандарту IEC 61131-3, мова ST підтримує весь необхідний набір типів, аналогічний класичних мов програмування. Цілочислені типи: SINT (char), USINT (unsigned char), INT (short int), UINT (unsigned int), DINT (long), UDINT (unsigned long), LINT (64 біт ціле), ULINT (64 біт ціле без знаку). Дійсні типи: REAL (float), LREAL (double).

Спеціальні типи BYTE, WORD, DWORD, LWORD представляють собою бітові рядки довжиною 8, 16, 32 і 64 біт відповідно. Бітових полів в ST немає. До двійкового рядка можна безпосередньо звертатися побітово.

Оскільки функції в моделі знаходяться послідовно, то вихід однієї подається на вхід наступної. А для реалізації зворотнього зв'язку, вихід останньої функції віднімається від входу перед подачею на першу функцію системи.

Код програми системи наведення з регулятором наведено в додатку А.

Тепер перевіримо адекватність запрограмованої моделі, переглянувши зміну виходу функції з плином часу в перехідному процесі (рисунок 6.3):

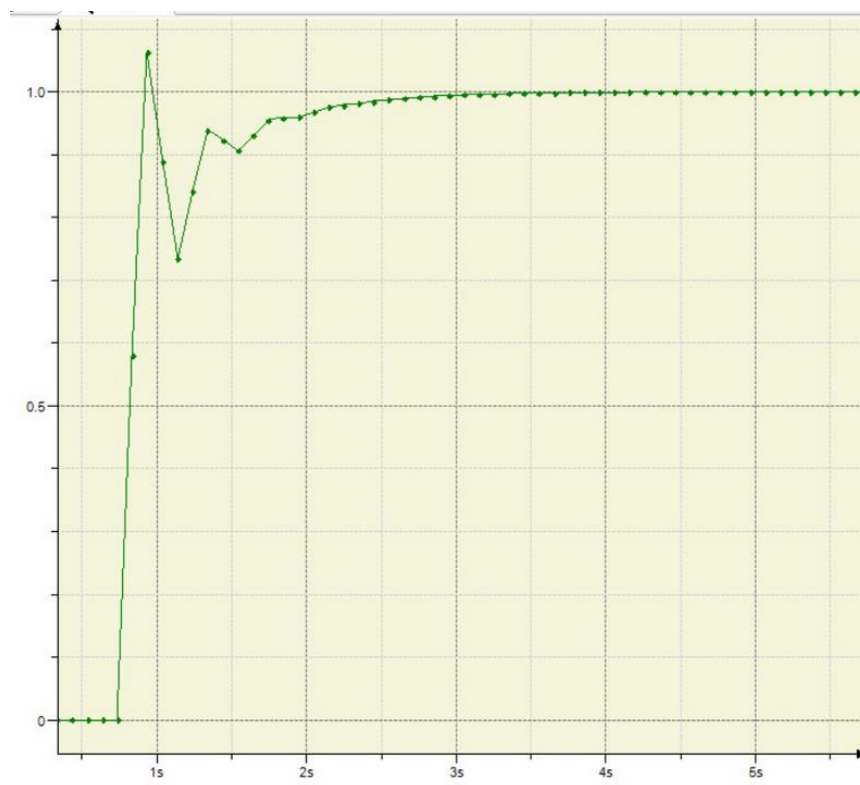


Рисунок 6.3 – Графік перехідного процесу запрограмованої системи

Як бачимо, графіки повністю співпали, що означає правильність програмування системи з регулятором.

ВИСНОВКИ

В дипломному проєкті розроблено та реалізовано систему наведення протитанкової ракети типу «Джавелін», яка підвищує точність наведення ракети та вірогідність ураження цілі.

Розроблено структурну та функціональну схеми системи наведення протитанкової ракети. Розроблено математичну модель цифрової системи і перевірено її якість та стійкість.

В дипломному проєкті виконано синтез цифрового регулятора за методами: бажаних передавальних функцій та ПД законами регулювання. За проведеним дослідженням було обрано кращий ПД-регулятор, який забезпечує системі наведення протитанкової ракети такі показники якості:

- похибка 0%;
- час встановлення 0,3с;
- час перехідного процесу 1,1с;
- перерегулювання 6%.

Обраний регулятор реалізовано методом безпосередньої декомпозиції у програмному пакеті Matlab Simulink та мовою програмування ST у середовищі CodeSys.

					IA62.180БАК.005 ПЗ	Лист
						64
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		

ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Латухин А. Н. Противотанковое вооружение / А.Н. Латухин - М.: Воениздат 1974
2. Лихтеров В.М. Обзорноаналитический справочник: Высокоточное оружие зарубежных стран. Том 1. Противотанковые ракетные комплексы / В.М. Лихтеров, В.В. Панов, В.К. Кудрасов - Тула. ГУП «КБП». 2008.
3. Краснов Н.Ф. Аэродинамика ракет / Н.Ф. Краснов, В.Н. Кошевой, А.Н. Данилов, В.Ф. Захарченко. - М.: Высшая школа. 1968.
4. Гришин Н. Развитие противотанковых средств. Зарубежное военное обозрение. — М.: «Красная Звезда», 1975.
5. Борисов Е.Г. Высокоточное оружие и борьба с ним / Е.Г. Борисов, В.И. Евдокимов — СПб.: Лань. 2013.
6. Headquarters, Department of the Army JAVELIN MEDIUM ANTIARMOR WEAPON SYSTEM —Washington D.C., 23. Januar 2003
7. Headquarters, Department of the Army, Field Manual Javelin: Close Combat Missile System. - Washington, DC, 20 March 2008.
8. Белозеров А.Ф. Современные зарубежные тепловизионные приборы / А.Ф. Белозеров, В.М. Иванов - Оптический журнал. 2003. Т. 70. № 10. С. 62 – 71.
9. Колючкин В.Я. Тепловизионные приборы и системы: учебное пособие / В.Я. Колючкин, Г.М. Мосягин - М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2003. 57 с.
10. John H. Blakelock. Automatic Control of Aircraft and Missiles Second Edition. - A WILEY-INTERSCIENCE PUBUCATION John Wiley & Sons, Inc. 1991.
11. Дорф Р. Современные системы управления / Р. Дорф, Р. Бишоп – М.: Лаборатория Базовых знаний. 2002
12. Репнікова Н.Б. Теорія автоматичного керування / Н.Б. Репнікова – К.: НТУУ «КПІ», 2011.

					IA62.180БАК.005 ПЗ	Лист
						65
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		

13. Репнікова Н.Б. Методичні вказівки до виконання лабораторних робіт для студентів напрямку 6.050201 «Системна інженерія». ТЕОРІЯ АВТОМАТИЧНОГО УПРАВЛІННЯ - 2. ТЕОРІЯ ЦИФРОВИХ СИСТЕМ УПРАВЛІННЯ. / Н.Б. Репнікова, А.В. Писаренко - К.: НТУУ «КПІ», 2012 .

14. Яланецький В.А., Юрчук Л.Ю. МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ до виконання лабораторних робіт з дисципліни «Комп'ютерне моделювання процесів і систем» кредитного модулю №2 «Моделювання систем керування» / В.А. Яланецький, Л.Ю. Юрчук - К.: НТУУ «КПІ», 2019.

15. Стандарт ІЕС 61131-3:2013. Мови програмування для програмованих логічних контролерів.

					ІА62.180БАК.005 ПЗ	Лист
						66
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		

ДОДАТОК А

Лістинг програмної реалізації системи наведення з регулятором

```
PROGRAM PLC_PRG
VAR_INPUT
    x:LREAL:=1;
END_VAR
VAR
    y_r:LREAL:=0;
    x_r:ARRAY[0..1] OF LREAL:=[0,0];
    y_m:ARRAY[0..2] OF LREAL:=[0,0,0];
    x_m:ARRAY[0..2] OF LREAL:=[0,0,0];
    y_i:ARRAY[0..1] OF LREAL:=[0,0];
    x_i:LREAL:=0;
END_VAR
VAR_OUTPUT
    y:LREAL;
END_VAR

x_r[1]:=x_r[0];
x_r[0]:=x - y_i[0];
y_r:=91.96029*x_r[0] - 87.9968*x_r[1];
y_m[2]:=y_m[1];
y_m[1]:=y_m[0];
x_m[2]:=x_m[1];
x_m[1]:=x_m[0];
x_m[0]:=y_r;
y_m[0]:=1.3913*y_m[1] - 0.4157*y_m[2] + 0.0063*x_m[0] - 0.00013*x_m[1] -
0.00373*x_m[2];
y_i[1]:=y_i[0];
x_i:=y_m[0];
y_i[0]:=y_i[1] + x_i;
y:=y_i[0].
```

					ІА62.180БАК.005 ПЗ	Лист
						67
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		